

Bachelorarbeit

im Studiengang Audiovisuelle Medien

Untersuchung verschiedener Beschallungskonzepte

vorgelegt von Raphael Dieterle

an der Hochschule der Medien Stuttgart

am 30. August 2019

zur Erlangung des akademischen Grades eines Bachelor of Engineering

Erstprüfer: Prof. Oliver Curdt

Zweitprüfer: Prof. Jens-Helge Hergesell

Erklärung an Eides Statt

Hiermit versichere ich, Raphael Dieterle, an Eides Statt, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit (bzw. Masterarbeit) mit dem Titel: „Untersuchung verschiedener Beschallungskonzepte“ selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Die Stellen der Arbeit, die dem Wortlaut oder dem Sinn nach anderen Werken entnommen wurden, sind in jedem Fall unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht. Die Arbeit ist noch nicht veröffentlicht oder in anderer Form als Prüfungsleistung vorgelegt worden.

Ich habe die Bedeutung der eidesstattlichen Versicherung und die prüfungsrechtlichen Folgen (§26 Abs. 2 Bachelor-SPO (6 Semester), § 23 Abs. 2 Bachelor-SPO (7 Semester) bzw. § 19 Abs. 2 Master-SPO der HdM) sowie die strafrechtlichen Folgen (gem. § 156 StGB) einer unrichtigen oder unvollständigen eidesstattlichen Versicherung zur Kenntnis genommen.

Stuttgart, 30. August 2019

Ort, Datum

Raphael Dieterle

Zusammenfassung

Das Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung verschiedener Beschallungskonzepte. Dazu gehören zweidimensionale Konzepte wie die Zweikanal-Stereofonie und Surround, als auch die Wellenfeldsynthese als dreidimensionales Konzept.

Hierfür werden die Grundlagen zur Schallausbreitung, Räumlichen Hören, der Hörsamkeit von Räumen sowie verschiedene Eigenschaften von Lautsprechern und deren Anordnungen erläutert. Auf dieser Basis wird gezeigt, wie verschiedene Beschallungskonzepte funktionieren und welche Eigenschaften sie aufweisen.

Auf dieser Basis wird gezeigt, wie diese Zusammenhänge durch verschiedene Beschallungskonzepte genutzt werden und welche Eigenschaften dadurch entstehen.

Im letzten Teil dieser Arbeit werden die Konzepte einander im Bezug auf Planungsaufwand, Installation, akustische Eigenschaften, sowie ihren Anforderungen im Bezug auf das Mixing gegenüber gestellt.

Abstract

The purpose of this thesis is the analysis of different concepts for sound reinforcement. This includes two-dimensional concepts like two-channel-stereophony and Surround as well as three-dimensional concepts like Wave Field Synthesis.

For this purpose the basic principles of sound propagation, spatial hearing, the acoustic quality of rooms and various loudspeaker characteristics as well as their interaction as array are going to be explained.

On this basis it will be shown how different concepts for sound reinforcement function and what the resulting characteristics of each concept are.

The final part of this research paper is the comparison of the presented concepts in respect of planning and installation effort, acoustic characteristics as well as their requirements regarding the mixing process.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen der Beschallung	3
2.1	Räumliches Hören	3
2.1.1	Eine Schallquelle	3
2.1.2	Mehrere Schallquellen	5
2.1.2.1	Präzedenzeffekt	6
2.1.2.2	Summenlokalisierung	6
2.2	Schallfelder	7
2.2.1	Ebene Welle	8
2.2.2	Kugelwelle	8
2.2.3	Zylinderwelle	9
2.3	Nahfeld / Fernfeld	9
2.4	Hörsamkeit	11
2.4.1	Nachhallzeit	11
2.4.2	Reflexionen	12
2.4.3	Klarheitsmaß	13
2.5	Akustische Kopplung	14
2.6	Richtcharakteristik	15
2.7	Hallradius	17
2.8	Lautsprecher-Anordnungen	17
2.8.1	Zentrale Beschallung	18
2.8.1.1	Geschichtliche Entwicklung	18
2.8.1.2	Cluster-System	20
2.8.1.3	Linienstrahler / Line-Array	21
2.8.2	Zentral gestützte Beschallung	23
2.8.3	Dezentrale Beschallung	25
3	2D-Beschallungskonzepte	27
3.1	Zweikanal-Stereofonie	27
3.1.1	Phantomschallquellen	28

3.1.2	Laufzeitstereofonie	29
3.1.3	Intensitätsstereofonie	30
3.1.4	Gemeinsames Auftreten von Intensitäts- und Pegelunterschieden	30
3.2	Mehrkanal-Stereofonie (Surround)	31
3.2.1	Funktionsweise	31
3.2.2	Standards	31
3.2.2.1	Dolby Stereo	31
3.2.2.2	5.1-Surround	32
3.2.2.3	7.1-Surround	33
3.2.3	Neue Möglichkeiten durch Mehrkanal-Stereophonie	33
3.2.3.1	Künstlerische Möglichkeiten	34
3.2.3.2	Technische Möglichkeiten	34
4	3D-Beschallungskonzepte	37
4.1	Wellenfeldsynthese	37
4.1.1	Funktionsweise	38
4.1.1.1	Huygens-Fresnel'sches Prinzip	38
4.1.1.2	Kirchhoff-Helmholtz-Integral	39
4.1.2	Probleme	41
4.1.2.1	Rechenaufwand	41
4.1.2.2	Spatial Aliasing	41
4.1.2.3	Beugungseffekte, Endeffekte	42
4.1.3	Vergleich zu herkömmlichen Beschallungskonzepten	44
4.1.3.1	Lokalisation	46
4.1.3.2	Quellen in der Hörzone	46
4.1.3.3	Erzeugung ebener Wellen	47
4.1.3.4	Raumanteil	48
4.1.4	Erhältliche Systeme	48
4.1.4.1	SpatialSound Wave	49
4.1.4.2	IOSONO	50
4.1.4.3	sonic emotion	50
4.1.5	Anwendung am Beispiel H104 der TU-Berlin	51

5 Vergleich	55
5.1 Planungsaufwand	55
5.2 Installation	56
5.2.1 Lautsprecher-Positionierung	56
5.2.2 Rigging	57
5.2.3 Processing	58
5.3 Akustische Eigenschaften	59
5.3.1 Positionierung von Schallquellen	59
5.3.2 Ortung	59
5.3.3 Raumsimulation	60
5.4 Einfluss und Anforderungen im Bezug auf Mixing	61
5.4.1 Anforderungen Mischpult	61
5.4.2 Panorama	62
5.4.3 Bewegte Schallquellen	62
6 Fazit	65
Literatur	67
Internet-Quellen	71
Standards und Normen	73
Abbildungsverzeichnis	75
Abkürzungen, Formelzeichen, Maßeinheiten	76

1 Einleitung

In der Beschallung gibt es eine Vielzahl verschiedener Konzepte, die ständig weiterentwickelt werden. Da jedes dabei seine Stärken und Schwächen besitzt, soll im Rahmen dieser Arbeit geklärt werden, welche dies sind und wie sie in der Beschallung genutzt werden können. Dabei soll es hauptsächlich um die Beschallung im Live-Bereich gehen.

Im Gegensatz zu einer Studioumgebung, wo es ausreichend ist an einem kleinen Punkt im Raum die bestmöglichen Wiedergabebedingungen zu haben, muss im Live-Bereich eine große Fläche versorgt werden. Dabei sollte der Höreindruck an allen Plätzen möglichst gleich sein. Mittlerweile ist die Beschallung nicht mehr nur ein Mittel um leise Schallquellen zu verstärken. Vielmehr ist sie ein Werkzeug geworden, jedem Zuhörer ein außergewöhnliches Erlebnis zu bieten. Um dies zu erreichen wurde die klassische Stereo-Beschallung ständig weiter entwickelt. Sei es durch neue Anordnungen und Bauweisen von Lautsprechern, die Ergänzung um zusätzliche Lautsprecher, wie es bei Surround der Fall ist, oder durch gänzlich neue Ansätze wie der Wellenfeldsynthese. All diese Konzepte haben gemeinsam, dass der Zuhörer sich von Schall umgeben fühlen soll. Sich also nicht mehr als Zuhörer wahrzunehmen, welcher eine Darbietung nur miterlebt, sondern als Teil von ihr.

Um die Funktionsweise der verschiedenen Konzepte zu verstehen, werden zunächst die Grundlagen zur Schallausbreitung, dem menschlichen Hören, sowie dem Zusammenwirken verschiedener Lautsprecher als Array erläutert. Anschließend werden auf dieser Grundlage verschiedene Beschallungskonzepte genauer vorgestellt. Diese sind die klassische Zweikanal-Stereofonie, sowie darauf aufbauend, verschiedene Arten der Mehrkanal-Stereofonie. Eine der Einschränkungen dieser Konzepte ist die Beschränkung auf eine Ebene. Deshalb wird darauf hin mit der Wellenfeldsynthese ein Konzept vorgestellt, welches auch in die Vertikale erweitert werden kann und außerdem andere interessante Eigenschaften, wie eine positionsunabhängige Schallquellenortung besitzt.

Im letzten Teil der Arbeit wird die Zweikanal-Stereofonie mit 5.1-Surround und der Wellenfeldsynthese mittels *IOSONO* verglichen. Dabei soll herausgefunden wer-

1 Einleitung

den, wie sich die Konzepte im Bezug auf Planungsaufwand, Installation, akustische Eigenschaften sowie deren Einfluss auf das Mixing unterscheiden.

2 Grundlagen der Beschallung

In diesem Kapitel werden zunächst die Grundlagen für das Verständnis der nachfolgenden Kapitel erläutert. Hierzu wird zunächst erklärt, wie das menschliche Gehör Schall einer bestimmten Richtung zuordnet. Anschließend wird näher auf verschiedene Schallfelder, sowie deren Verhalten im Nah- und Fernfeld eingegangen. Da es für das Verständnis der verschiedenen Beschallungskonzepte wichtig ist, verschiedene Kriterien zur Beurteilung der Raumakustik zu haben, wird danach die Hörsamkeit von Räumen erläutert. Abschließend werden verschiedene Grundlagen für die Betrachtung von Lautsprechern erklärt, wie die akustische Kopplung, die Richtcharakteristik, der Hallradius, sowie verschiedene Lautsprecheranordnungen.

2.1 Räumliches Hören

In diesem Abschnitt wird zunächst das räumliche Hören mit einer Schallquelle und im Anschluss mit mehreren Schallquellen erläutert. Dabei wird zur Vereinfachung von einem freien Schallfeld ausgegangen. Solche Schallfelder finden sich in der Realität hauptsächlich in reflexionsarmen Räumen und auf schneebedeckten Bergspitzen, sind jedoch hilfreich für die Analyse des Räumlichen Hörens.¹ Um das Hörereignis einem bestimmten Ort zuzuordnen, wird im allgemeinen ein kopfbezogenes Koordinatensystem (Abbildung 2.1.1) verwendet, welches horizontale Ebene, Medianebene und Frontalebene aufspannt.²

2.1.1 Eine Schallquelle

Bei Schalleinfall aus der Medianebene hängt bei schmalbandigen Signalen die Hörereignisrichtung nicht mit der Schalleinfallrichtung zusammen. Dies lässt sich ex-

1. Vgl. Jens Blauert und Jonas Braasch, „Räumliches Hören“, in *Handbuch der Audiotechnik*, hrsg. von Stefan Weinzierl (Berlin: Springer, 2008), 93-94.

2. Michael Dickreiter und Jürgen Goeres-Petri, „Schallwahrnehmung“, in *Handbuch der Tonstudioteknik*, 8. Aufl., hrsg. von Michael Dickreiter u. a., Bd. 1 (Berlin: De Gruyter Saur, 2014), 128.

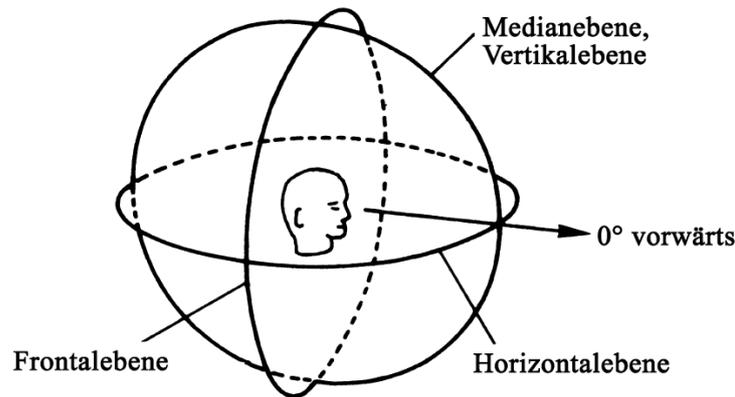


Abb. 2.1.1: Kopfbezogenes Koordinatensystem in: Dickreiter und Goeres-Petri, „Schallwahrnehmung“, 128

perimentell feststellen, indem Versuchspersonen mit schmalbandigen Signalen aus wechselnden Richtungen beschallt werden und nun angeben sollen, aus welcher Richtung diese kommen. Hier zeigt sich, dass die Hörereignisrichtung hauptsächlich von der Terzmittenfrequenz und nicht von der Schalleinfallrichtung abhängt. Bei breitbandigen Signalen stimmen Hörereignisrichtung und Schalleinfallrichtung jedoch meistens überein. Dies liegt an der Filterwirkung der Außenohren, welche je nach Schalleinfallrichtung bestimmte Schallanteile anhebt bzw. absenkt. Der am stärksten präsente Frequenzbereich ist für die Richtungsbestimmung verantwortlich.³ Dieser Filter wird als Außenohr Übertragungsfunktion (HRTF) bezeichnet und ist für jeden Menschen unterschiedlich.⁴

Liegt die Schalleinfallrichtung außerhalb der Medianebene, unterscheiden sich die beiden Ohrsignale in Phase, sowie frequenzabhängigen Pegeldifferenzen voneinander (interaural). Hierdurch kann das Ohr zusätzliche Information für die Lokalisation gewinnen. Die Lokalisationsschärfe liegt in der Horizontalebene bei $\pm 4^\circ$ sowie bei $\pm 10^\circ$ in der Medianebene.⁵ Bei frontalem Schalleinfall sinkt sie auf bis zu $\pm 1^\circ$, dies gilt jedoch nicht für tiefe Frequenzen. Der durchschnittliche Ohrabstand beträgt 17 cm, was bei einem Einfallswinkel von 90° einer Laufzeitverschiebung von 0,61 ms entspricht und zu einer vollständigen Seitwärtsortung führt. Dies funktioniert bei

3. Vgl. Blauert und Braasch, „Räumliches Hören“, 93-95.

4. Vgl. Thomas Görne, *Tontechnik: Hören, Schallwandler, Impulsantwort, Faltung, Sigma-Delta-Wandler, Stereo, Surround, WFS, Regiegeräte, tontechnische Praxis*, 4. Aufl., hrsg. von Ulrich Schmidt (München: Carl Hanser, 2014), 126.

5. Vgl. Blauert und Braasch, „Räumliches Hören“, 95-98.

einer Laufzeitdifferenz von 0,61 ms und quasistationären Signalen jedoch nur für Frequenzen unterhalb von 1,63 kHz, da die Wellenlänge größer als die Laufzeitdifferenz sein muss. Andernfalls kommt es zur mehrdeutigen Ortung.⁶

Für Wellenlängen, welche klein im Verhältnis zum Kopfdurchmesser sind, entsteht durch Reflexion an einer Seite des Kopfes ein Druckstau, an der anderen ein Schallschatten. Dies führt zu einem interauralen Pegelunterschied und einer Ortung in Richtung der der Schallquelle zugewandten Seite. Für tieffrequente Signale wird die Ortung schlechter, da mit zunehmender Wellenlänge der Phasenwinkel zwischen den Ohrsignalen kleiner wird. Außerdem werden mehr Schallanteile um den Kopf gebeugt, was zu einer kleineren Pegeldifferenz führt.⁷

2.1.2 Mehrere Schallquellen

Nun sollen die vorhergehenden Zusammenhänge auf die Situation mit mehreren Schallquellen übertragen werden. Diese trifft in der Praxis schon ein, wenn man nicht mehr von einem Reflexionsarmen Raum ausgeht. Dann entstehen an den Reflexionspunkten sog. Spiegelschallquellen, welche sich mit dem Direktschall überlagern. Laut Blauert und Braasch lässt sich zwischen drei Fällen unterscheiden:⁸

1. Das Hörereignis hängt von den Orten und Signalen beider Quellen ab: Summenlokalisation
2. Das Hörereignis hängt von der zuerst ertönenden Quelle und ihren Signalen ab: Präzedenzeffekt
3. Mehrere Hörereignisse entstehen: Echo

Da Summenlokalisation und Präzedenzeffekt eine wesentliche Rolle für alle räumlichen Beschallungskonzepte spielen, werden diese nun genauer erklärt.

6. Vgl. Görne, *Tontechnik*, 126.

7. Vgl. ebd., 127.

8. Vgl. Blauert und Braasch, „Räumliches Hören“, 99-100.

2.1.2.1 Präzedenzeffekt

Vor allem in geschlossenen Räumen treffen, neben dem Direktschall, eine Vielzahl verschiedener Schallreflexionen beim Hörer ein. Es ist jedoch selbst im diffusen Schallfeld, in dem der Pegel der Reflexionen den Direktschallpegel übersteigt, möglich eine Schallquelle zu orten. Ausschlaggebend hierfür ist die erste beim Hörer eintreffende Wellenfront (Haas Effekt). Liegt die Verzögerungszeit zwischen Primär- und Sekundärschall im Bereich $\leq 0,6$ ms, werden die beiden Signale vom Ohr als seitliche Schallquelle interpretiert.⁹ Dieser Effekt wird z.B. bei der Laufzeitstereophonie genutzt.

Ist die Verzögerungszeit groß, wird das Schallereignis nicht seitlich, sondern als zwei getrennte Schallereignisse wahrgenommen. Dies bezeichnet man als Echo. Die Schwelle, bei der dieser Effekt eintritt, hängt von der Art des Signals, sowie dem Pegelunterschied zwischen den Signalen ab. Bei einer Verzögerungszeit ≤ 30 ms kann der Pegel des Sekundärschalls um bis zu 10 dB über dem der Primärschallquelle liegen, ohne dass die Ortung auf diese verloren geht. Diesen Effekt nutzt man in der Beschallung beispielsweise für *Delay-Lines* (siehe 2.8.2) und kann trotz geringerem Lautstärkepegel des vom Hauptsystem stammenden Schalls, die Ortung bei diesem behalten.¹⁰

2.1.2.2 Summenlokalisation

Wie in Abschnitt 2.1.1 beschrieben, ist das Gehör in der Lage auch Pegeldifferenzen zwischen den Ohrsignalen in eine Richtungsinformation umzusetzen. Dieser Effekt wird beispielsweise bei der Stereophonie (siehe Abschnitt §3.1) genutzt, welche hier als Beispiel dienen soll. Die Ohrsignale setzen sich jeweils aus zwei Anteilen der verschiedenen Schallquellen zusammen, welche sich im Pegel unterscheiden. Trotzdem werden die Signale nur als ein Schallereignis interpretiert, dessen Ortung vom Schallanteil mit dem höchsten Pegel abhängt. In Abbildung 2.1.2 ist dargestellt, wie sich in Abhängigkeit der Pegel- bzw. Laufzeitdifferenz die Lokalisation verändert. Vollständige Lokalisation auf einen der beiden Lautsprecher findet demnach bei

9. Vgl. Görne, *Tontechnik*, 128.

10. Vgl. ebd.

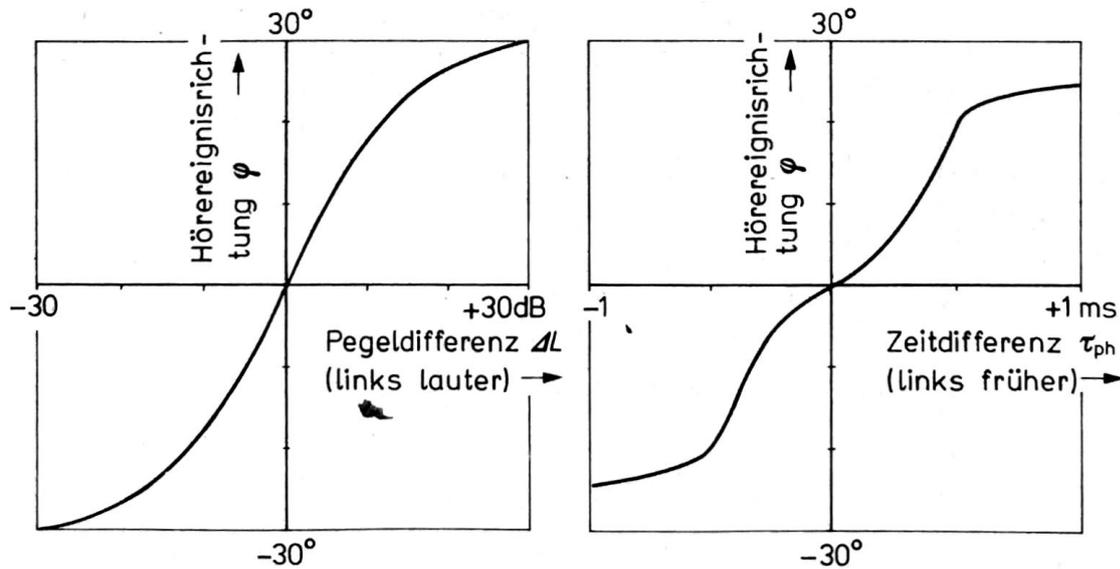


Abb. 2.1.2: Summenlokalisationskurven für Pegel- bzw. Laufzeitdifferenzen der beiden Lautsprechersignale. Breitbandsignale, Zuhörerkopf fixiert. In: Weinzierl, *Handbuch der Audiotechnik*, 101

einem Pegelunterschied von 30 dB statt, wobei in der Praxis abhängig von der Art des Signals auch schon ein Pegelunterschied von 12 dB bis 15 dB ausreichen kann.¹¹

In diesem Abschnitt wurde gezeigt, wie Schall vom Gehör einer bestimmten Einfallrichtung zugeordnet wird. Bei schrägem Schalleinfall in der Medianebene spielen dabei vor allem die Filtereffekte des Außenohrs eine Rolle. Fällt Schall in der Horizontalebene ein, so ist die Ortung sowohl bei einer als auch mehreren Schallquellen hauptsächlich von Präzedenzeffekt, sowie Summenlokalisierung abhängig.

2.2 Schallfelder

Nachfolgend wird ein Überblick über die verschiedenen Schallfelder gegeben, da durch verschiedene Lautsprecher-Anordnungen auch verschiedene Schallfelder erzeugt werden. Die beschriebenen Formen stellen Idealisierungen dar, welche in der Praxis nur teilweise umgesetzt werden können. Grundsätzlich entsteht ein Schallfeld durch

11. Vgl. Blauert und Braasch, „Räumliches Hören“, 101-103; vgl. Günther Theile u. a., „Tonaufnahme und Tonwiedergabe“, in Dickreiter u. a., *Handbuch der Tonstudioteknik*, 1:222-223.

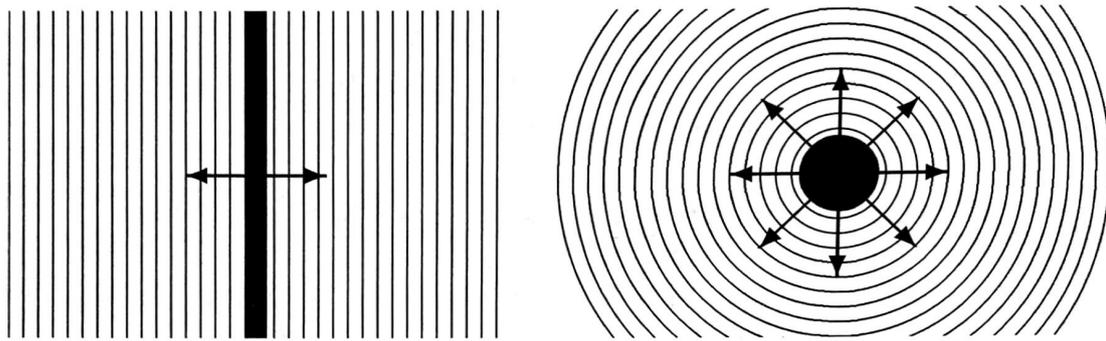


Abb. 2.2.1: Links: Ebene Welle, rechts: Kugelwelle in: Görne, *Tontechnik*, 36

die Anregung der Umgebung (z.B. Luft) einer Schallquelle, welche die Teilchen zum Schwingen anregt. Abhängig von ihrer Form wird zwischen verschiedenen Schallfeldern unterschieden.

2.2.1 Ebene Welle

Der Einfachste Fall eines Schallfelds ist die ebene Welle. Darunter versteht man ein Schallfeld, in welchem sich Schalldruck und Schallschnelle lediglich in einer Dimension, nämlich in Ausbreitungsrichtung verändern. Vernachlässigt man die Luftreibung ist die Schallintensität dadurch unabhängig von der Entfernung. In der Theorie lässt sich eine ebene Welle mit einer unendlich großen Schallwand erzeugen. In der Praxis kommen sie näherungsweise in der Nähe von großen Schallquellen oder in großer Entfernung zu kugelförmigen Schallquellen vor, wo die Krümmung der Wellenfronten vernachlässigt werden kann. Bei der ebenen Welle sind Schalldruck und Schallschnelle phasengleich.¹²

2.2.2 Kugelwelle

Bei der Kugelwelle ist das Schallfeld konzentrisch um die Schallquelle herum aufgebaut. In der Praxis kommt sie beispielsweise im Bassbereich von Lautsprechern vor, da die Schallwellen um das im Verhältnis zur Frequenz kleine Gehäuse gebeugt

12. Vgl. Stefan Weinzierl, „Grundlagen“, in Weinzierl, *Handbuch der Audiotechnik*, 34-35.

werden. Da sich die Schallenergie mit größer werdender Entfernung auf immer größere Kugelschalen verteilt, muss die Schallintensität in Abhängigkeit zur Entfernung abnehmen. Da $I \sim p^2$ nimmt die Schallintensität mit $1/r^2$ ab, der Schalldruck mit $1/r$. Dies entspricht einem Pegelverlust von 6 dB pro Entfernungsverdopplung. Bei der Kugelwelle sind Schalldruck und -schnelle in Abhängigkeit von Frequenz und Entfernung zur Schallquelle phasenverschoben.¹³

2.2.3 Zylinderwelle

Zylinderwellen sind Schallwellen, welche sich in Form eines Zylinders, also lediglich in zwei Dimensionen ausbreiten (Abbildung 2.2.2). Hierdurch verteilt sich die Schallenergie bei Entfernungsverdopplung nicht mehr auf die vierfache Fläche, wie bei einer Kugelwelle, sondern lediglich auf die zweifache. Die Schallintensität sinkt somit pro Entfernungsverdopplung nur um 3 dB. Diesen Effekt macht man sich beispielsweise bei Linienstrahlern und Line-Arrays zu nutze, welche dadurch im Vergleich zu punktförmigen Schallquellen bei gleich lauter Beschallung eine deutlich größere Reichweite haben.¹⁴

2.3 Nahfeld / Fernfeld

Bei der Beschreibung von Schallfeldern muss zwischen Nahfeld und Fernfeld unterschieden werden. Die Richtcharakteristik eines Lautsprechers beschreibt beispielsweise nur dessen Verhalten im Fernfeld. Effekte wie der Nahbesprechungseffekt dagegen nur im Nahfeld der Schallquelle. An welchem Punkt das Nahfeld ins Fernfeld übergeht, hängt von verschiedenen Kriterien ab: vgl. Weinzierl, „Grundlagen“, 35-38

1. Alle Teilbereiche eines ausgedehnten Strahlers zum Betrachter weisen die gleiche entfernungsbedingte Amplitudenabnahme auf. Dies gilt für $r \gg h$ mit der Entfernung Lautsprecher-Zuhörer r und der Quellenausdehnung h . Dieses Kriterium geht jedoch nicht auf die Phasenlage ein.

13. Vgl. Weinzierl, „Grundlagen“, 34-35; vgl. Görne, *Tontechnik*, 35-37.

14. Vgl. Bernhard Schullan, Ralf Zuleeg und Wolfgang Hoeg, „Beschallung“, in Dickreiter u. a., *Handbuch der Tonstudioteknik*, 1:595.

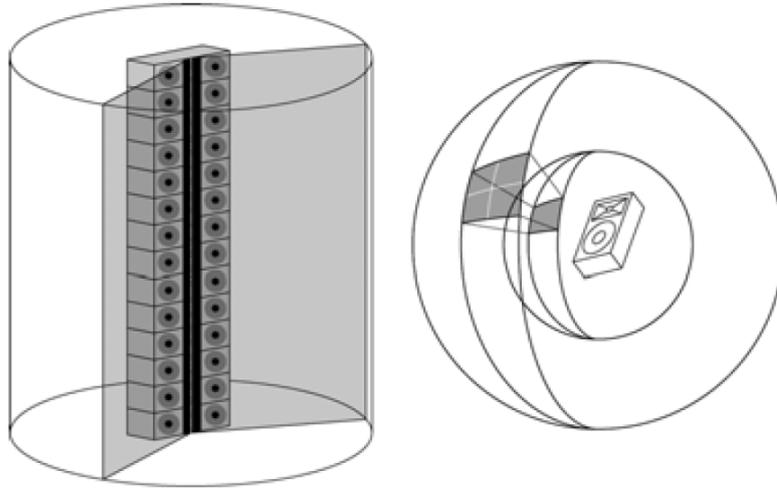


Abb. 2.2.2: Links: Zylindermantelfläche= $2\pi \cdot r \cdot h$; rechts: Kugelmantelfläche= $4\pi r^2$ mit r =Radius, h =Höhe. In: Schullan, Zuleeg und Hoeg, „Beschallung“, 596

2. „Das **zweite Kriterium** beruht auf der Annahme, dass sich die Phasenunterschiede mit denen sich die Beiträge verschiedener Bereiche des Strahlers beim Betrachter überlagern, als Funktion des Winkels beschreiben lassen, unter dem sich der Betrachter vom Mittelpunkt des Strahlers aus gesehen befindet.“¹⁵ Geht man davon aus, dass die Laufzeitdifferenz beim Zuhörer nicht größer als 45° sein darf, so ergibt sich ein Übergang vom Nah- ins Fernfeld bei:

$$r > \frac{h^2}{\lambda} \quad (2.1)$$

Das dritte Kriterium ist die Forderung nach vernachlässigbaren Phasendifferenzen zwischen Schalldruck- und schnelle. Demnach ist das Nahfeld der Bereich mit

$$r < \frac{c}{\omega} = \frac{\lambda}{2\pi} \quad (2.2)$$

ω = Kreisfrequenz [s^{-1}]

λ = Wellenlänge [m]

c = Schallgeschwindigkeit [m/s]

Welche dieser Kriterien erfüllt sein müssen hängt dabei vom Anwendungsfall ab.

15. Weinzierl, „Grundlagen“, 36.

2.4 Hörsamkeit

In diesem Abschnitt wird näher auf die Hörsamkeit eingegangen. Darunter versteht man die akustischen Eigenschaften eines Raumes, sowie die daraus resultierenden Auswirkungen auf eine Schalldarbietung.¹⁶ Unter Raum versteht man in diesem Zusammenhang nicht zwingendermaßen einen Innenraum, sondern kann sich auch auf Freiflächen beziehen. Um diese Eigenschaften zu beschreiben, werden verschiedene Kennwerte benötigt, welche messtechnisch ermittelt werden können. Diese werden nachfolgend genauer erläutert.

2.4.1 Nachhallzeit

Eines der Hauptkriterien zur akustischen Beurteilung von Räumen ist die Nachhallzeit. Unter Nachhall versteht man dabei den Teil des Schalls, welcher nach Direktschall und ersten Reflexionen beim Hörer ankommt.¹⁷ Die Nachhallzeit wurde vom Akustiker Sabine als „[...] die Zeit definiert, in der die mittlere Energiedichte $\omega(t)$ des Raums, von einer starken, den Raum gleichmäßig erfüllenden Schallerregung ausgehend, um 60 dB abnimmt.“¹⁸ Sie wird auch als Sabinesche Nachhallzeit oder Nachhallzeit T_{60} bezeichnet. Da die Messung über einen Pegelabfall von 60 dB in der Praxis schwer umzusetzen ist, wird oftmals die Zeit für einen Abfall von 30 dB gemessen (T_{30}) und auf den T_{60} -Wert umgerechnet.¹⁹

Üblicherweise wird die Nachhallzeit über einen Frequenzbereich von 125 Hz bis 4 kHz betrachtet, da unterhalb von 125 Hz akustische Maßnahmen zur Dämpfung nur schwer umzusetzen sind und oberhalb von 4 kHz die meisten Oberflächen bereits stark absorbierend wirken. Auch die Luftreibung spielt dann eine entscheidende Rolle. So kann die Nachhallzeit bei Frequenzen um 5 kHz 3,1 s und bei 10 kHz 1,2 s

16. Vgl. Wolfgang Ahnert und Walter Reichardt, *Grundlagen der Beschallungstechnik* (Stuttgart: Hirzel, 1981), 50.

17. Vgl. Günther Hartmann, *Praktische Akustik: Raum- und Bauakustik*, Bd. 2 (München: R. Oldenbourg, 1968), 90.

18. Ahnert und Reichardt, *Grundlagen der Beschallungstechnik*, 52.

19. Vgl. Christian Nocke, *Raumakustik im Alltag: Hören - Planen - Verstehen* (Stuttgart: Fraunhofer IRB, 2014), 89-92.

nicht überschreiten. Da das Reflexionsverhalten von Oberflächen stark frequenzabhängig ist (siehe 2.4.2), ist somit auch die Nachhallzeit frequenzabhängig und lässt Rückschlüsse auf die Klangfarbe eines Raums zu. Besitzt ein Raum in einem bestimmten Frequenzbereich eine verhältnismäßig lange Nachhallzeit, führt dies durch ständige Überlagerung von Direkt- und Diffusschall zu einer Überbetonung dieses Frequenzbereichs.²⁰

2.4.2 Reflexionen

Trifft Schall auf ein Hindernis, wie eine Raumbegrenzungsfläche, tritt er mit diesem in Wechselwirkung. Dabei treten anteilig Reflexion, Absorption und Transmission auf. Da Transmission in der Beschallung eine untergeordnete Rolle spielt, wird diese hier vernachlässigt.

Ist das Hindernis groß im Verhältnis zur Wellenlänge, so wird der Schall an ihm reflektiert. Andernfalls wird er um das Hindernis herum gebeugt. Zur Vereinfachung soll hier nur auf die Reflexion an ebenen Flächen eingegangen werden. Hier verhält sich Schall ähnlich wie ein Lichtstrahl und man kann das aus der Optik bekannte Reflexionsgesetz anwenden. Dieses besagt, dass der Einfallswinkel dem Ausgangswinkel entspricht. Dieses Verhalten wird z.B. in Konzerthäusern genutzt, um den Schall mittels gezielt erzeugter Reflexionen in die verschiedenen Publikumsbereiche zu lenken und dort die Lautstärke zu erhöhen. Durch Reflexion entsteht jedoch auch der unerwünschte Effekt stehender Wellen: Trifft Schall senkrecht auf eine Raumbegrenzung oder wird in einer Ecke zweimal reflektiert, so verlaufen einfallende und ausfallende Schallstrahlen parallel. Die reflektierte Schallwelle bewegt sich jedoch in umgekehrter Schwingungsrichtung, was von einer ortsabhängigen Überhöhung auf die doppelte Amplitude bis hin zur kompletten Auslöschung führt.²¹

Bei Reflexionen unterscheidet man zwischen den ersten Reflexionen und dem Nachhall. Als frühe Reflexionen werden dabei alle innerhalb von 50 ms (bei Sprache) bzw. 80 ms

20. Vgl. Michael Dickreiter, „Grundlagen der Akustik“, in Dickreiter u. a., *Handbuch der Tonstudientechnik*, 1:37-39.

21. Vgl. Dickreiter, „Grundlagen der Akustik“, 18-19; vgl. Günther Hartmann, *Praktische Akustik: Einführung*, Bd. 1 (München: R. Oldenbourg, 1964), 52-53.

(bei Musik) nach dem Direktschall beim Hörer eintreffenden Reflexionen bezeichnet, als Nachhall alle späteren. Wie die Struktur der Reflexionen die Wahrnehmung dieser beeinflusst, wird im folgenden Abschnitt gezeigt.

2.4.3 Klarheitsmaß

Um ein messbares Maß für die Durchsichtigkeit von Musikdarbietungen zu schaffen, wurde das Klarheitsmaß C_{80} eingeführt. Dieses gibt das Verhältnis von ersten Reflexionen (< 80 ms nach Eintreffen des Direktschalls) zu allen später eintreffenden Reflexionen an und wird nach Gleichung (2.3) berechnet.²²

$$C_{80} = 10 \log \frac{E_{80}}{E_{\infty} - E_{80}} \text{ dB} \quad (2.3)$$

E_{80} = Schallenergie innerhalb der ersten 80 ms nach Eintreffen des Direktschalls
[J]

E_{∞} = Gesamte Schallenergie [J]

Unter der Annahme eines diffusen Schallfelds kann statt der messtechnischen Ermittlung auch ein Erfahrungswert $C_{80,E}$ in Abhängigkeit zum Raumvolumen V , der Nachhallzeit T sowie der Entfernung Schallquelle-Hörerplatz nach Gleichung (2.4) berechnet werden.²³

$$C_{80,E} = 10 \log \frac{\left(\frac{r_H}{r_x}\right) + 1 - e^{\frac{13,8 \cdot 0,08}{T}}}{e^{\frac{13,8 \cdot 0,08}{T}}} \text{ dB} \quad (2.4)$$

r_x = Entfernung Schalquelle-Zuhörerplatz [m]

r_H = Hallradius [m]

V = Raumvolumen [m^3]

T = Nachhallzeit [s]

22. Vgl. Wolfgang Ahnert und Hans-Peter Tennhardt, „Raumakustik“, in Weinzierl, *Handbuch der Audiotechnik*, 198-199.

23. Vgl. ebd.

Laut Dickreiter sind positive Werte für die Wiedergabe von Musik ausreichend. Vor allem schnelle oder perkussive Passagen erfordern jedoch eine höhere Klarheit. Nach Abdel Alim sollten die Werte im folgenden Bereich liegen:²⁴

- $C_{80} \geq -1,6$ dB für klassische Musik
- $C_{80} \geq -4,6$ dB für romantische Musik

In diesem Abschnitt wurde gezeigt welche Maße hauptsächlich für die Bewertung der Hörsamkeit von Räumen verwendet werden. Der Klangcharakter eines Raumes kann dabei hauptsächlich durch die frequenzabhängige Nachhallzeit bestimmt werden. Als Maß für die Klarheit von Musik oder Sprache dagegen eignet sich das Klarheitsmaß, welches den Direktschall mit dem durch Reflexionen entstehenden Diffusschall ins Verhältnis setzt.

2.5 Akustische Kopplung

Da für die Beschallung einer großen Zuschauerfläche meist mehrere Lautsprecher nötig sind, werden diese in Form von Arrays oder Clustern betrieben. Dabei kommt es zu Interferenzen zwischen den Lautsprechern. Diese sind hauptsächlich von der abgestrahlten Frequenz, sowie dem Abstand zwischen den Lautsprechern abhängig. Hier ist der Abstand zwischen den Membran-Mittelpunkten der Lautsprecher gemeint, da sich ein einzelner Lautsprecher wie ein Punktstrahler verhält. Ist die Wellenlänge des abgestrahlten Schalls kleiner als der Abstand zwischen den Lautsprechern kommt es zur akustischen Kopplung. Die Schallquellen verhalten sich dann wie ein einziger Lautsprecher und es treten keine Interferenzen mehr auf. Dies ist im Bassbereich mit großen Wellenlängen leicht zu erreichen, im Hochtonbereich jedoch nicht. Wie mit Hilfe verschiedener Lautsprecheranordnungen versucht wird dieses Verhalten zu nutzen wird in Abschnitt 2.8.1 beschrieben.²⁵

24. Vgl. W. Reichardt, Alim Abdel und W. Schmidt, „Definitionen und Meßgrundlage eines objektiven Maßes zur Ermittlung der Grenze zwischen brauchbarer und unbrauchbarer Dursichtigkeit bei Musikdarbietungen“, *Acustica*, Nr. 32 (3 1975): 126-137 zitiert nach Ahnert und Tennhardt, „Raumakustik“, 199; vgl. Dickreiter, „Grundlagen der Akustik“, 34

25. Vgl. H. Frisch, „Beschallungstechnik“, in *Taschenbuch der Technischen Akustik*, 3. Aufl., hrg. von Gerhard Müller und Michael Möker (Berlin: Springer, 2013), 450-452, doi:10.1007/978-3-642-18893-0_14.

2.6 Richtcharakteristik

Unter Richtcharakteristik versteht man eine Beschreibung des Abstrahlverhaltens von Lautsprechern und des Aufnahmeverhaltens bei Mikrofonen, an dieser Stelle soll es jedoch nur um Lautsprecher gehen. Das Abstrahlverhalten ist wichtig, da sich nur durch die Wahl geeigneter, auf den Raum abgestimmter Lautsprecher ein befriedigendes Ergebnis erreichen lässt. Im Vergleich zu Lautsprechern für den Studiobetrieb ist bei Beschallungsanlagen neben dem Anspruch auf einen linearen Frequenzgang in Hauptabstrahlrichtung auch ein klar definierter Abstrahlwinkel erforderlich. So kann man bei der Planung einer Beschallungsanlage (nachfolgend PA) abschätzen, welchen Publikumsbereich ein Lautsprecher abdecken kann und wie Lautsprecher-Arrays zusammengesetzt, positioniert und ausgerichtet werden sollen. Beispielsweise lässt sich so bei einem Line-Array vermeiden, dass ein Publikumsbereich von mehreren Lautsprechern eines Arrays beschallt wird. So lassen sich die, vor allem im Hochtonbereich problematischen, Interferenzen zwischen den Lautsprechern minimieren. Auch kann so eine unnötige Anregung des Raums und damit der Diffusschallanteil verringert werden. Die meisten Hersteller geben für ihre Lautsprecher einen horizontalen, sowie vertikalen Öffnungswinkel an. Dieser gibt den Winkel an, ab dem der Schalldruck im Verhältnis zur Hauptabstrahlrichtung um 6 dB gefallen ist. Als Alternative zur Angabe mit Hilfe der Öffnungswinkel gibts es das Polardiagramm, Isobarenkurven, welche die Richtcharakteristik jedoch lediglich in einer Ebene beschreiben. Für eine dreidimensionale Beschreibung der Richtcharakteristik werden meist Balloon-Daten verwendet. Diese werden in einem kugelförmigen Raster um den Lautsprecher herum gemessen und führen so zu einer Darstellung, wie sie in Abbildung 2.6.1 zu sehen ist.²⁶

Zur Beschreibung der dreidimensionalen Richtwirkung eines Lautsprechers können auch der aus der Balloon-Darstellung abgeleitete Bündelungsgrad bzw. das Bündelungsmaß verwendet werden. Dieser „[...] gibt den Schalldruck des Lautsprechers auf der Hauptachse im Verhältnis zum Schalldruck einer idealen Kugelquelle an, die eine identische akustische Gesamtleistung in den Raum abstrahlt.“²⁷ Der Bündelungsgrad

26. Vgl. Anselm Goertz, „Lautsprecher“, in Weinzierl, *Handbuch der Audiotechnik*, 483-487.

27. Ebd., 487.

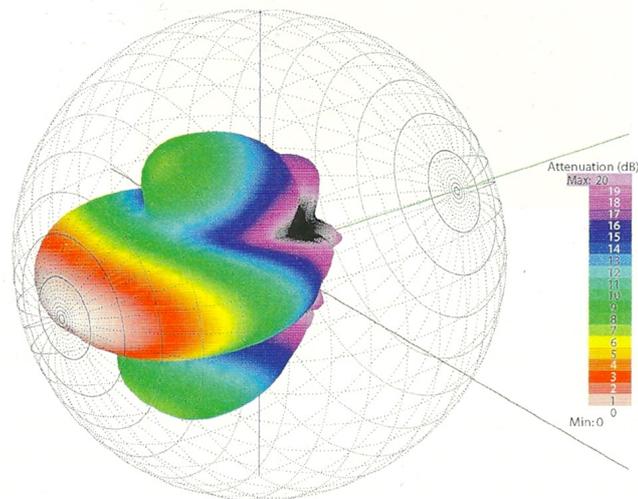


Abb. 2.6.1: Ballon zur Darstellung des räumlichen Abstrahlverhaltens eines Lautsprechers in einem Terzband. In:Goertz, „Lautsprecher“, 486

berechnet sich wie folgt:²⁸

$$\gamma(f) = \frac{4\pi}{\oint_S \Gamma^2(\varphi, \delta, f) dS} \text{ mit } \varphi = 0 \dots \pi \text{ und } \delta = -\pi \dots + \pi \quad (2.5)$$

$$\Gamma(\varphi, \delta, f) = \frac{p(\varphi, \delta, f)}{p(0, 0, f)} \quad (2.6)$$

φ = Drehung in der horizontalen Ebene [°]

δ = Rotation um die Mittelachse des Lautsprechers [°]

Γ = Richtungsfaktor []

Die in diesem Abschnitt erläuterte Beschreibung der Richtcharakteristik eines Lautsprechers kann genutzt werden um bei der Planung einer PA im Vorfeld abzuschätzen welche Arten von Lautsprechern eingesetzt werden sollen. Auch die erhältlichen softwarebasierten Planungswerkzeuge verwenden die Richtcharakteristik (meist in Form der Balloon-Darstellung) um das entstehende Schallfeld zu berechnen.

²⁸. Vgl. Goertz, „Lautsprecher“, 487.

2.7 Hallradius

Unter dem Hallradius versteht man den Abstand zur Schallquelle, bei dem in einem Schallfeld der Direktschallanteil dem Diffus-schallanteil entspricht. Bei einer punktförmigen Schallquelle nimmt der Schalldruckpegel pro Entfernungsverdopplung um 6 dB ab, während der Schalldruckpegel des Diffusschalls innerhalb des gesamten Raums gleich ist. Der resultierende Schalldruckpegel liegt dabei 3 dB über dem Schalldruckpegel seiner Komponenten. Außerhalb des Hallradius überwiegt der Diffusschallanteil, wodurch der Hörer eine Schallquelle nicht mehr in ihrem Ursprung orten kann. Da bei der Beschallung der Bezug zwischen dem optischen Eindruck und der Hörereignisrichtung erhalten bleiben soll, sollte sich der Hörer möglichst innerhalb des Hallradius befinden. Dies lässt sich z.B. durch gerichtete Lautsprecher erreichen, welche einerseits mit ca. 3 dB bis 4 dB einen geringeren Pegelabfall pro Entfernungsverdopplung aufweisen und zudem durch ihre Richtwirkung weniger Diffusschall verursachen. Der Hallradius lässt sich in Abhängigkeit von Bündelungsgrad γ , der Nachhallzeit T sowie dem Raumvolumen nach Gleichung (2.7) berechnen und wird dann als effektiver Hallradius bezeichnet.²⁹

$$r_{\text{Heff}} = 0,057 \cdot \sqrt{\gamma} \cdot \sqrt{\frac{V}{T}} \quad (2.7)$$

- r_{Heff} = effektiver Hallradius [m]
- T = Nachhallzeit [s]
- γ = Bündelungsgrad der Schallquelle []
- V = Raumvolumen [m³]

2.8 Lautsprecher-Anordnungen

Für die Beschallung von Großveranstaltungen ist im Regelfall ein hoher Schalldruckpegel erforderlich. Um diesen zu erzeugen, werden verschiedene Lautsprecher

²⁹. Vgl. Dickreiter, „Grundlagen der Akustik“, 40-42.

miteinander kombiniert. Dies ermöglicht auch eine bessere Kontrolle über deren Abstrahlverhalten und minimiert die unnötige Anregung des Raums durch Diffusschall. Im folgenden werden verschiedene Lautsprecher-Anordnungen näher erläutert und darauf eingegangen, welche Wechselwirkungen zwischen den Lautsprechern auftreten. Ausgehend von der geschichtlichen Entwicklung wird hierfür zunächst die zentrale Beschallung erklärt. Nachfolgend wird näher auf die Eigenschaften der zentral gestützten Beschallung sowie der dezentralen Beschallung eingegangen.

2.8.1 Zentrale Beschallung

Unter zentraler Beschallung versteht man die Beschallung mittels eines oder mehrerer Lautsprecher, welche an einem zentralen Punkt (Bühnenmitte bei Mono bzw. links und rechts von der Bühne bei Zweikanal-Stereo) angebracht werden. Für den Einsatz einer solchen PA gibt es verschiedene Voraussetzungen. So darf in geschlossenen Räumen der Abstand Lautsprecher - Zuhörer nicht zu groß sein, da sonst im Nahbereich der Lautsprecher sehr hohe Schalldruckpegel entstehen, um die hinteren Bereich noch ausreichend mit Schall zu versorgen. Außerdem sollte die Nachhallzeit nicht zu hoch sein, sonst kommt es durch starke Anregung des Diffusfelds zu einer Minderung der Deutlichkeit. Letztlich muss die Architektur die Installation eines solchen Systems zulassen, was bei größeren Veranstaltungen mit einer Vielzahl von Lautsprechern und dem daraus resultierenden Platzbedarf, sowie den damit einhergehenden statischen Anforderungen zum Problem werden kann.³⁰

Nachfolgend wird zunächst die Geschichtliche Entwicklung dargestellt und dann genauer auf die Eigenschaften von Cluster-Systemen sowie Line-Arrays eingegangen.

2.8.1.1 Geschichtliche Entwicklung

In die Kategorie der zentralen Beschallung lassen sich schon die ersten auf dem Markt erhältlichen Beschallungsanlagen wie dem 1945 von *Altec Lansing* vorgestellten *Voice*

³⁰ Vgl. Helmut A. Müller und Manfred Heckl, *Taschenbuch der technischen Akustik*, 2. Aufl. (Berlin: Springer, 1995), 647.

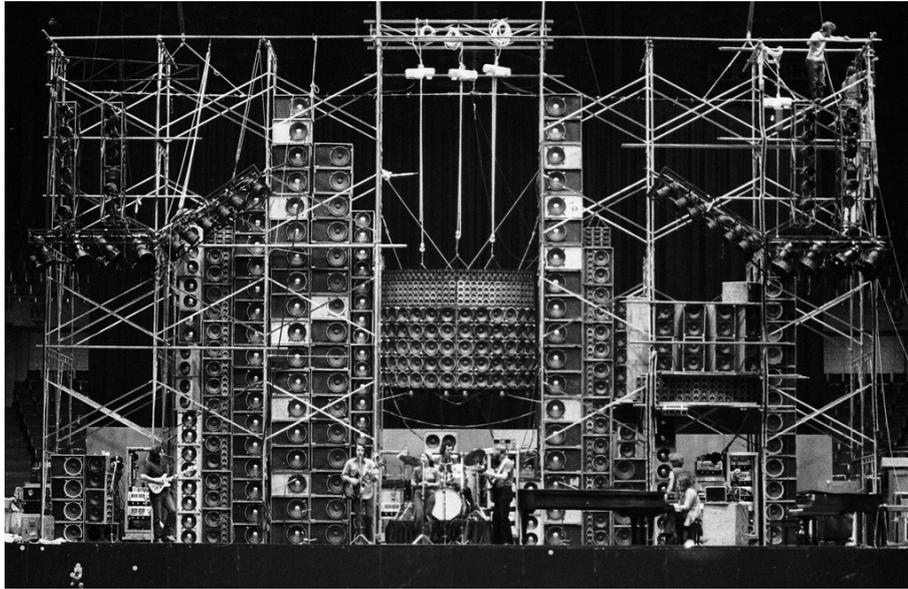


Abb. 2.8.1: Grateful Dead's „Wall Of Sound” Richard Pechner in Osborne, „Remembering The Grateful Dead's ‘Wall of Sound’: An Absurd Feat of Technological Engineering“

Of The Theatre einordnen. Diese wurden entwickelt, um die 1929 beginnende Verbreitung des Tonfilms und die damit einhergehenden, ständig größer werdenden Kinosäle mit bis zu tausend Sitzplätzen zu beschallen. Da die damals verbreiteten Röhrenverstärker keine hohen Ausgangsleistungen erbringen konnten und der Wirkungsgrad der Lautsprecher gering war, entwickelte man die ersten Hornlautsprecher. Diese ermöglichen einen höheren Schalldruckpegel bei gleichbleibender Leistung, sowie eine bessere Richtwirkung der Lautsprecher. Die in den 1950er Jahren beginnende Popularisierung der E-Gitarre, welche den Ausgangspunkt der Rock- und Popmusik darstellt, führte zum Bedarf an konzerttauglichen Beschallungsanlagen. Diese gab es damals praktisch nicht, weshalb die Verstärkung ausschließlich über die *Backline* erfolgte. Dies führt jedoch bei größeren Konzerten dazu, dass die unverstärkten Instrumente zunehmend in den Hintergrund geraten und die tonale Balance dadurch zerstört wird. Erst in den 1960er Jahren wurde durch die Entwicklung der Transistortechnik der Bau leistungsstärkerer, preiswerter Verstärker möglich. Dadurch war es möglich neben dem Gesang auch andere Instrumente zu mikrofonieren und über die PA wiederzugeben.³¹

31. Vgl. Frank Pieper, *Das P.A. Handbuch : Praktische Einführung in die professionelle Beschallungstechnik*, 4., Aufl. (München: GC Carstensen, 2011), 40-42.

In den 1970er Jahren wurde es üblich, bei großen Veranstaltungen riesige Lautsprechertürme zu errichten, wie es beispielsweise bei der *Wall Of Sound* der Band *Grateful Dead* (Abbildung 2.8.1) zu sehen ist. Viele der damals verwendeten Lautsprecher waren Eigenkonstruktionen, da es damals nur wenige kommerziell verfügbare Alternativen gab. Auch mangelte es an dem heute üblichen Zubehör, wie Flugrahmen und Motoren. Die Lautsprecher mussten deshalb mit erheblichem Arbeitsaufwand auf Gerüsten montiert werden. Jeder Frequenzbereich (bei *Grateful Dead* sogar für jedes Instrument) hatte dabei seinen eigenen Lautsprecher. So kamen im Bassbereich gefaltete Hörner, für untere Mitten Kurzhörner und für obere Mitten und hohe Frequenzen breit fächernde Hörner zum Einsatz. Erst einige Jahre später wurden diese zu Fullrange-Lautsprechern kombiniert, was den Transport- und Installationsaufwand erheblich reduzierte. In den folgenden Jahren sorgten Entwicklungen wie der Neodymium-Magnet, bessere Werkstoffe, leistungsfähigere Verstärkerschaltungen, die sprunghaften Fortschritte in der Digitaltechnik, sowie die Entwicklung des Line-Arrays, auf die in Abschnitt 2.8.1.3 genauer eingegangen wird, für große Verbesserungen in der PA-Technik.³²

2.8.1.2 Cluster-System

Die im letzten Abschnitt erwähnten frühen Beschallungsanlagen lassen sich in die Kategorie der Cluster-Systeme einordnen. Darunter versteht man einen Zusammenschluss von Lautsprechern, welcher an einem zentralen Punkt in der Nähe der Aktionsfläche positioniert wird, wie bei *Grateful Dead* direkt auf der Bühne. Diese Anordnung hat verschiedene Vorteile. Zum einen sind die abgestrahlten Wellenfronten weitgehend kohärent, da sich alle Lautsprecher in einer Ebene befinden. Auch bleibt die Ortung ohne großen Aufwand auf der Aktionsfläche, sofern sich der Hörer nicht nah an der Bühnenkante befindet, wo der Schall von oben geortet wird. Letztlich werden Laufzeitstörungen vermieden, welche bei der später erläuterten dezentralen Beschallung, sowie der zentral gestützten Beschallung Probleme verursachen können.³³

32. Vgl. Pieper, *Das P.A. Handbuch*, 40-42.

33. Vgl. Wolfgang Ahnert und Frank Steffen, *Beschallungstechnik: Grundlagen und Praxis*. (Stuttgart: Hirzel, 1993), 246-247; vgl. Schullan, Zuleeg und Hoeg, „Beschallung“, 570-571.

Die Anordnung als Cluster sorgt für eine Vergrößerung der Richtentfernung, welche sich für einen gegebenen Bündelungsgrad der Strahlergruppe γ_L nach Gleichung (2.8) berechnen lässt. Dies sorgt dafür, dass sich selbst in akustisch schwierigen Räumen ein großer vom Direktschall bestimmter Bereich bildet, was zu einer hohen Deutlichkeit führt.³⁴

$$r_R = \sqrt{\gamma_L} \Gamma_L(\vartheta) r_H \quad (2.8)$$

r_R = Richtentfernung [m]

γ_L = Bündelungsgrad der Strahlergruppe []

$\Gamma_L(\vartheta)$ = Richtungsfaktor dieser Lautsprecheranordnung []

r_H = Hallradius [m]

Bei der Anordnung als Cluster gibt jedoch ein Problem: Bei großen Räumen muss mit dem Hauptsystem der gesamte Publikumsbereich beschallt werden, welcher jedoch eine gleichmäßige Lautstärkeverteilung aufweisen sollte. Eine PA in Clusteranordnung verhält sich im Fernfeld wie ein Punktstrahler. Da sich bei einer Verdopplung der Entfernung die Schalleistung I auf die vierfache Fläche verteilt, nimmt diese in Abhängigkeit von der Entfernung r mit $I = 1/r^2$ ab. Dies zeigt das mit einem solchen System keine gleichmäßige Pegelverteilung im gesamten Publikumsbereich möglich ist. Soll der hintere Publikumsbereich mit einem ausreichend hohen Schalldruckpegel versorgt werden, führt dies in der Nähe der Lautsprecher schnell zu Pegeln, welche sich schädlich auf die Ohren auswirken können. Eine Lösung hierfür ist einerseits das im folgenden Abschnitt behandelte Line-Array, sowie die zentral gestützte Beschallung, bei der die hinteren Publikumsbereiche hauptsächlich von Stützlautsprechern versorgt werden.³⁵

2.8.1.3 Linienstrahler / Line-Array

Unter einem Linienstrahler versteht man einen linienförmigen Lautsprecher, welcher entweder aus einer Membran besteht (z.B. Bändchenlautsprecher) oder aus vielen vertikal in ein Lautsprechergehäuse eingebauten Membranen. Die Bauweise in einem

34. Vgl. Ahnert und Steffen, *Beschallungstechnik: Grundlagen und Praxis.*, 246-247.

35. Vgl. Schullan, Zuleeg und Hoeg, „Beschallung“, 571-572.

Gehäuse ist jedoch sehr unflexibel in der Anwendung und eigentlich nicht mehr zeitgenössisch. Mittlerweile ist man dazu übergegangen, die Linie aus einzelnen Lautsprechern zusammensetzen, welche mit variablen Winkel zueinander (*Curving*) untereinander angeordnet werden. Diese Anordnung bezeichnet man als *Line-Array*. Da beide Bauweisen mit den gleichen akustischen Prinzipien arbeiten, sollen sie hier gemeinsam behandelt werden.

Grundsätzlich macht man sich beim *Line-Array* die Eigenschaft zu nutze, dass sich mehrere nah aneinander angeordnete Membranen verhalten, wie eine einzelne große Membran. Dieses als Kopplung bezeichnete Verhalten gilt jedoch nur unterhalb einer Grenzfrequenz, welche vom Abstand der Membran-Mittelpunkte zueinander abhängt (vgl. Abschnitt 2.5). Oberhalb dieser Grenzfrequenz bilden sich in der Richtcharakteristik neue seitliche Hauptmaxima.³⁶

Da die Schallquelle nun nicht mehr punkt- sondern linienförmig ist, breitet sich der Schall nicht mehr kugelförmig, sondern in Form einer Zylinderwelle aus. Dies führt dazu, dass sich die Schallenergie pro Entfernungsverdopplung nicht mehr auf die vierfache, sondern lediglich auf die zweifache Fläche verteilt. Die Schallintensität nimmt dadurch im Nahfeld nur noch mit $I = 1/r$, also pro Entfernungsverdopplung nur noch um 3 dB statt um 6 dB ab, was eine deutlich größere Reichweite zur Folge hat. Die einzelnen Lautsprechermodule bestehen dabei meist aus einem horngeladenen Zwei- oder Dreiwegelautsprecher, welche auf ihren jeweiligen Frequenzbereich abgestimmt sind. Da die akustische Kopplung für hohe Frequenzen nicht wirksam wird, arbeitet man in diesem Frequenzbereich mit Wellenformern (*Waveguides*) welche eine idealisierte ebene Schallwelle erzeugen. Die Lautsprechermodule werden eng untereinander montiert und sind so konstruiert, dass sich die Schallwellen jedes Lautsprechers phasenrichtig mit dem darüber und darunter befindlichen Lautsprecher verbinden. Ein solcher Linienstrahler erzeugt für alle Frequenzen, deren Wellenlänge kleiner als die Baulänge des Line-Arrays ist, eine Zylinderwelle. Frequenzen unterhalb dieser Grenze werden nach wie vor als Kugelwelle abgestrahlt.³⁷

Das beschriebene Verhalten gilt nur im Nahfeld der Schallquelle. Im Fernfeld geht die Zylinderwelle in eine sphärische Wellenfront über und öffnet sich auch in der

36. Vgl. Goertz, „Lautsprecher“, 444-445.

37. Vgl. Michael Ebner, *Handbuch der PA-Technik*, 1. Aufl. (Aachen: Elektor, 2002), 227-229; vgl. Schullan, Zuleeg und Hoeg, „Beschallung“, 595-596.

vertikalen Ebene. Der Übergang vom Nahfeld zum Fernfeld lässt sich für einen Linienstrahler rechnerisch in Abhängigkeit zur Frequenz f und der Länge des Arrays l nach folgender Gleichung berechnen:

$$r = \frac{l^2 \cdot f}{2c} \quad (2.9)$$

r = Übergang Nahfeld-Fernfeld [m]

l = Länge des Line-Arrays [m]

f = Frequenz [Hz]

c = Schallgeschwindigkeit [m/s]

In der Praxis lässt sich hierdurch bei einer gegebenen Entfernung durch Umformen der Gleichung die nötige Länge des Arrays für die gewünschte untere Grenzfrequenz ermitteln. Für $r = 100$ m, $f = 60$ Hz und $c = 343$ m/s würde beispielsweise eine Länge von 33,81 m benötigt. Dies ist in der Praxis kaum umsetzbar. Wiederholt man die Berechnung für $f = 400$ Hz ergibt sich eine Länge von 13,10 m. Für diese, in der Praxis schon eher realisierbare Länge, ergibt sich für $f = 100$ Hz³⁸ ein Übergang vom Nah- ins Fernfeld bei 25,01 m.

Im Gegensatz zu früheren Beschallungsanlagen mit sphärischen Wellenfronten, bei denen es über die Distanz hauptsächlich zu einem Abfall der hohen Frequenzen kam, ist heute also bei den meisten PAs genau das Gegenteil der Fall.

2.8.2 Zentral gestützte Beschallung

Wie im vorherigen Abschnitt gezeigt wurde, kann die zentrale Beschallung an ihre Grenzen stoßen, wenn:

- Die Publikumsfläche sehr groß ist

³⁸. beispielhafte Trennfrequenz für *L-Acoustics Kara* in Verwendung mit SB18, geflogen (Quelle: L-Acoustics, „Product Spec Sheet SB18“)

- Aufgrund von architektonischen Gesichtspunkten ein ausreichend dimensioniertes Hauptsystem nicht möglich ist
- Die Schallausbreitung durch Hindernisse gestört wird

Ein möglicher Lösungsansatz hierfür ist die zentral gestützte Beschallung. Hier kommen zusätzlich zum Hauptsystem weitere Stützlautsprecher zum Einsatz. Diese können entweder in Ausbreitungsrichtung des Hauptsystems (*Delay-Line*), seitlich zum Hauptsystem (*Outfill*), auf der Bühne als Unterstützung des Monitorings (*Sidedefill*) oder im Nahbereich der Bühne (*Nearfill/Frontfill*) angebracht werden. Da bei musikalischen Darbietungen die Ortung auf der Bühne bzw. auf dem Hauptsystem bleiben und Kammfiltereffekte vermieden werden sollen, nutzt man den in Abschnitt 2.1.2 beschriebenen Haas-Effekt.

Hierfür wird der Stützlautsprecher in Abhängigkeit der Entfernung zum Hauptsystem verzögert, woraus sich auch die Bezeichnung *Delay-Line* (Verzögerung = engl. Delay) ableitet. Die nötige Laufzeitverzögerung kann laut Frisch wie folgt abgeschätzt werden.³⁹

$$\Delta T = (SE - LE) \cdot 3 \frac{\text{ms}}{\text{m}} + 10 \text{ ms [ms]} \quad (2.10)$$

ΔT = einzustellende Laufzeitverzögerung [ms]

SE = Abstand der zu ortenden Schallwuelle vom Empfänger (Zuhörer) [m]

LE = Abstand des zu verzögernden Lautsprechers vom Empfänger [m]

Falls eine genauere Berechnung erforderlich ist, lässt sich die Verzögerung auch in Abhängigkeit zur Temperatur berechnen.⁴⁰

$$\Delta T = \frac{(SE - LE)}{c} + 0,015 \text{ s} \quad \text{mit } c \approx 331,6 + (0,6 * \vartheta) \text{ [m/S]} \quad (2.11)$$

39. Vgl. Frisch, „Beschallungstechnik“, 647.

40. Vgl. Ahnert und Steffen, *Beschallungstechnik: Grundlagen und Praxis.*, 254; vgl. Eberhard Sengpiel, „Berechnung der Schallgeschwindigkeit in Luft und die wirksame Temperatur“, besucht am 13. August 2019, <http://www.sengpielaudio.com/Rechner-schallgeschw.htm>.

c = Schallgeschwindigkeit in Luft [m/s]

ϑ = Temperatur [°C]

Hierbei wird jeweils im ersten Teil der Gleichung die nötige Laufzeitverzögerung für zeitgleiches Eintreffen des Schalls berechnet und anschließend nach Frisch ein Wert von 10 ms, nach Ahnert ein Wert von 15 ms bis 25 ms addiert. Diese Addition sorgt für eine eindeutige Ortung auf dem Hauptsystem. Nun kann der Pegel des Stützlautsprechers sogar um bis zu 10 dB höher sein, als der Pegel des Hauptsystems an diesem Punkt. Die Beschallung erfolgt also hauptsächlich durch den Stützlautsprecher, die Ortung bleibt jedoch auf dem Hauptsystem. Hierdurch lässt sich über den gesamten Publikumsbereich eine ähnliche Lautstärkeverteilung erreichen und auch Veränderungen im Frequenzgang, wie sie z.B. bei hohen Frequenzen aufgrund der Luftreibung auftreten, können kompensiert werden. Außerdem lassen sich so Randbereiche z.B. neben der Bühne beschallen, welche vom Hauptsystem aufgrund seiner Richtwirkung nicht mehr erreicht werden.⁴¹

2.8.3 Dezentrale Beschallung

Als letztes zweidimensionales Beschallungskonzept wird im folgenden Abschnitt die dezentrale Beschallung besprochen, welche einen anderen Ansatz als zentrale und zentral gestützte Beschallung verfolgt. Ziel ist hier eine möglichst hohe Verständlichkeit zu erreichen, indem durch viele publikumsnahe Lautsprecher die Anregung des Diffusfelds minimiert wird. Eine solche Beschallung wird z.B. gern bei Konferenzen in Form von Sessellautsprechern genutzt. Da bei einer solchen Anlage die Laufzeitdifferenz zwischen nächstgelegenen und entferntesten Lautsprecher meist größer als 50 ms ist können jedoch Echos auftreten. Um dies zu vermeiden, gibt es zwei Lösungen:⁴²

Die erste ist der schon aus dem letzten Abschnitt bekannte Einsatz von Verzögerungsgliedern (*Delays*) und stark rückwärtsdämpfenden Lautsprechern. Hierdurch wird jedoch eine sehr große Anzahl an Verstärkerkanälen benötigt, da jeder Lautsprecher einzeln angesteuert werden muss. Die zweite Lösung ist es, mit den Stützlautsprechern

41. Vgl. Ahnert und Steffen, *Beschallungstechnik: Grundlagen und Praxis.*, 254; vgl. Frisch, „Beschallungstechnik“, 647.

42. Vgl. Ahnert und Steffen, *Beschallungstechnik: Grundlagen und Praxis.*, 256-257.

einen so hohen Pegel zu erzeugen, dass der Pegel, der für die Echo-Entstehung verantwortlichen weit entfernten Lautsprecher, vernachlässigbar klein wird und im Diffusschall untergeht.⁴³

In diesem Abschnitt wurde ein Überblick über die üblichen Lautsprecher-Anordnungen gegeben. Dabei wurde gezeigt, wie die zentrale Beschallung aufgebaut ist und wie durch Verwendung von Line-Arrays die akustischen Eigenschaften der Zylinderwelle genutzt werden können, um die Reichweite zu erhöhen und die Richtwirkung zu steuern. Ergänzt man die zentrale Beschallung um Stützlautsprecher, lässt sich auch für große Publikumsbereiche eine relativ gleichmäßige Versorgung mit Schall gewährleisten ohne die Ortung auf der Bühne zu verlieren. Abschließend wurde ein kurzer Einblick in die dezentrale Beschallung gegeben, welche sich aufgrund ihrer Eigenschaften jedoch hauptsächlich für Sprachverstärkung eignet.

43. Vgl. Siegfried Wirsum, *Praktische Beschallungs-Technik: Gerätekonzepte, Installation, Optimierung; und 12 Tab.* (München: Franzis, 1991), 15-17; vgl. Ahnert und Steffen, *Beschallungstechnik: Grundlagen und Praxis.*, 256-257.

3 2D-Beschallungskonzepte

Im folgenden Abschnitt werden die gängigen 2D-Beschallungskonzepte vorgestellt. Diese basieren auf der Stereophonie, deren Funktionsweise zunächst erläutert wird. Anschließend wird auf die Zweikanal-Stereophonie eingegangen, welche sowohl in der Beschallungstechnik, als auch im Heimgebrauch nach wie vor das am weitesten verbreitete Beschallungskonzept darstellt. Ausgehend davon wird im folgenden Abschnitt die Mehrkanal-Stereophonie, welche auch als Surround bekannt ist, sowie deren verschiedene Standards dargestellt.

Für die räumliche Tonwiedergabe gibt es verschiedene Prinzipien. Das erste ist die Binauraltechnik (Kunstkopfverfahren) welche versucht die Richtungswahrnehmung durch die Reproduktion der Ohrsignale zu erreichen. Da dieses Verfahren jedoch für die Wiedergabe auf Kopfhörern konzipiert ist, soll hierauf nicht näher eingegangen werden. Das zweite Verfahren ist die Stereophonie, welche die Richtungswahrnehmung durch Laufzeit- oder Pegelunterschiede der Signale erzeugt. Das dritte Verfahren ist die WFS, welches mit Synthese eines beliebigen Schallfelds durch eine Vielzahl von Schallquellen arbeitet. Da die WFS ein dreidimensionales Beschallungskonzept darstellt, wird sie in Abschnitt 4.1 behandelt.¹

3.1 Zweikanal-Stereophonie

Die Zweikanal-Stereophonie ist im Musikbereich nach wie vor das am weitesten verbreitete Beschallungskonzept. Dies liegt zum einen an der einfachen technischen Umsetzung, zum anderen an der historisch begründeten großen Verbreitung. Nahezu alle kommerziell verfügbare Musik ist im Zweikanal-Format verfügbar. Im folgenden wird anhand der Phantomschallquellenbildung zunächst die Funktionsweise der Zweikanal-Stereophonie erklärt. Diese lässt sich nach Art der auftretenden Differenzen zwischen den Kanälen in Laufzeit- und Intensitätsstereophonie unterteilen, wobei auch eine Kombination von beiden möglich ist.

1. Vgl. Theile u. a., „Tonaufnahme und Tonwiedergabe“, 217-220.

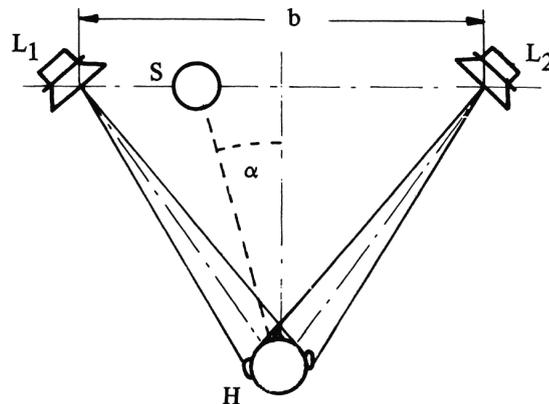


Abb. 3.1.1: Standard Lautsprecheranordnung für Zweikanal Stereowiedergabe. In: Theile u. a., „Tonaufnahme und Tonwiedergabe“, 221

3.1.1 Phantomschallquellen

Ordnet man zwei Lautsprecher L_1 und L_2 wie in Abbildung 3.1.1 in einem gleichschenkligen Dreieck an und gibt über sie zeitgleich das selbe Signal wieder, so wird das Signal vom Hörer nicht wie aus zwei Schallquellen wahrgenommen, sondern aus einer fiktiven Schallquelle in der Mitte der Basis (Gerade zwischen den Lautsprechern). Diese Schallquelle bezeichnet man als Phantomschallquelle. Werden nun Pegel und/oder Laufzeit zwischen den Lautsprechern verändert, so wandert die Schallquelle entlang der Basis zur Seite, bis sie in einem der Lautsprecher stehen bleibt. Dies bietet die Grundlage für Laufzeit- und Intensitätsstereofonie.²

Die Breite der Basis bzw. der Öffnungswinkel zwischen den Lautsprechern hat einen großen Einfluss auf die Wahrnehmung bei der Wiedergabe. Ein kleiner Winkel schränkt das Stereopanorama ein und führt zu einer schlechteren Lokalisation. Ein großer Winkel führt zu einer instabilen Verteilung der Phantomschallquellen, was sich vor allem bei Kopfbewegungen bemerkbar macht und kann eine Abweichung der Lokalisation von der Basis in der Vertikalen führen. In den 1960er Jahren hat man sich deshalb auf einen Winkel von 60° bei dem das Dreieck zwischen den Lautsprechern und dem Hörer gleichschenkelig wird. Toleriert man bei der Wiedergabe eine leichte Fehllokalisation, ergibt sich die in Abbildung 3.1.2 zu sehende Hörfläche.³

2. Vgl. Theile u. a., „Tonaufnahme und Tonwiedergabe“, 221-222.

3. Vgl. Karl M. Slavik und Stefan Weinzierl, „Wiedergabeverfahren“, in Weinzierl, *Handbuch der Audiotechnik*, 661.

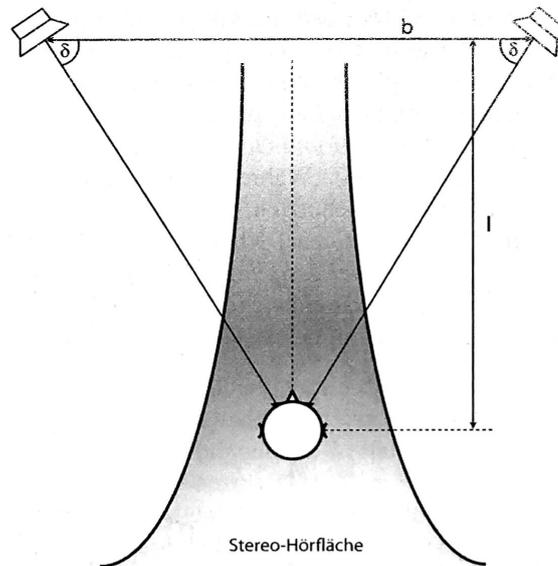


Abb. 3.1.2: Hörfläche bei Zweikanal-Stereofonie. In: Slavik und Weinzierl, „Wiedergabeverfahren“, 611

3.1.2 Laufzeitstereofonie

Wenn die Positionierung der Schallquelle im Stereopanorama mittels Laufzeitunterschied erfolgt, spricht man von Laufzeitstereofonie. Diese lässt sich aufnahmeseitig mittels *AB-Anordnung* erreichen, bei der die Aufnahme mittels zweier Mikrofone mit dem sogenannten Basisabstand zueinander erfolgt. Durch die Wegdifferenz zwischen den beiden Mikrofonen ergibt sich die erwünschte Laufzeitdifferenz, wobei bereits eine Differenz von 1,2 ms zu einer 100% seitlichen Abbildung führt.⁴

Wie stark die Laufzeitdifferenz die Richtungswahrnehmung beeinträchtigt, hängt auch vom jeweiligen Signal ab. Während bei Sprache bereits schon geringe Laufzeitdifferenzen zu einer Auslenkung führen, werden bei tiefen sinusförmigen Dauertönen größere Differenzen benötigt.⁵

4. Vgl. Stefan Weinzierl, „Aufnahmeverfahren“, in Weinzierl, *Handbuch der Audiotechnik*, 578-579.

5. Vgl. Theile u. a., „Tonaufnahme und Tonwiedergabe“, 224-225.

3.1.3 Intensitätsstereofonie

Bei der Intensitätsstereofonie wird die Auslenkung der Schallquellen durch Pegelunterschiede zwischen den Lautsprechern erreicht. Diese entstehen aufnahmeseitig durch XY- oder MS-Anordnung, welche mittels zweier gerichteter Mikrofone erfolgt. Diese werden mit einem Versatzwinkel zueinander angebracht. Durch die unterschiedlichen Einfallswinkel entstehen abhängig von der Richtcharakteristik Pegeldifferenzen zwischen den Mikrofonen.⁶

In der Praxis erfolgt die Lokalisation bei einem Pegelunterschied von 12 dB bis 15 dB 100% seitlich. Dies ist nur geringfügig von der Art des Signals abhängig.⁷

3.1.4 Gemeinsames Auftreten von Intensitäts- und Pegelunterschieden

Neben der reinen Intensitäts- bzw. Laufzeitstereofonie, die ausschließlich mit Pegel- oder Laufzeitdifferenzen arbeiten, können abhängig von der verwendeten Mikrofonanordnung auch beide gleichzeitig auftreten. Dabei ist die Auslenkung der Phantomschallquelle größer, als bei alleinigen Laufzeit- oder Pegeldifferenzen. Falls die Differenzen ungefähr mit gleichem Anteil auftreten, führt dies zu einer Verbesserung der Lokalisationsschärfe und umgekehrt.⁸

In diesem Abschnitt wurde gezeigt, wie sich Laufzeit- und Pegelunterschiede zwischen zwei Signalen nutzen lassen, um durch Phantomschallquellenbildung auch Schallquellen zwischen zwei Lautsprechern zu orten. Diese Funktionsweise lässt sich auch mit zusätzlichen Kanälen erweitern und wird dann als Mehrkanal-Stereofonie bezeichnet. Auf diese wird im folgenden näher eingegangen.

6. Vgl. Weinzierl, „Aufnahmeverfahren“, 574-578.

7. Vgl. Theile u. a., „Tonaufnahme und Tonwiedergabe“, 222-223.

8. Vgl. ebd., 225-226.

3.2 Mehrkanal-Stereofonie (Surround)

Surround ist ein Mehrkanal-Verfahren, welches ursprünglich für den Filmtone entwickelt wurde. Bereits vor der Einführung von Surround gab es mit der Quadrofonie ein Mehrkanal-Verfahren für die Musikwiedergabe, welches sich jedoch nicht durchsetzen konnte.⁹ Surround kann auch für die Beschallung von Veranstaltungen genutzt werden, weshalb im folgenden Abschnitt ein Überblick über dessen Funktionsweise sowie die verschiedenen Standards gegeben wird.

3.2.1 Funktionsweise

Wie auch die Zweikanal-Stereofonie basiert Surround auf dem Prinzip der Phantomschallquellenbildung. Ziel der Entwicklung war es dabei eine optimale räumliche Darstellung zu gewährleisten und gleichzeitig einen möglichst großen *Sweet Spot* (auch als *Sweet Area* bezeichnet) zu schaffen. Auch war es wichtig den Standard so zu gestalten, dass ohne großen Aufwand ein zweikanaliges Signal (nachfolgend Stereo) aus den Surround Kanälen generiert werden kann (*Downmix*).¹⁰

3.2.2 Standards

3.2.2.1 Dolby Stereo

Dolby Stereo war der erste Surround Standard, welcher 1977 von *Dolby* und *Lucasfilm* für den Film *Star Wars* eingeführt wurde. *Dolby Stereo* besteht aus den vier Kanälen L (Left), C (Center), R (Right) und S (Surround) welche durch Matrizierung zu einem Stereo-Signal zusammengefasst werden und bei Wiedergabe wieder dekodiert werden müssen. Diese Technik bietet zwar den Vorteil der Stereokompatibilität, hat jedoch mit nur 3 dB eine schlechte Kanaltrennung.¹¹

9. Vgl. Görne, *Tontechnik*, 306-307.

10. Vgl. Theile u. a., „Tonaufnahme und Tonwiedergabe“, 279-280.

11. Vgl. Görne, *Tontechnik*, 306-307.

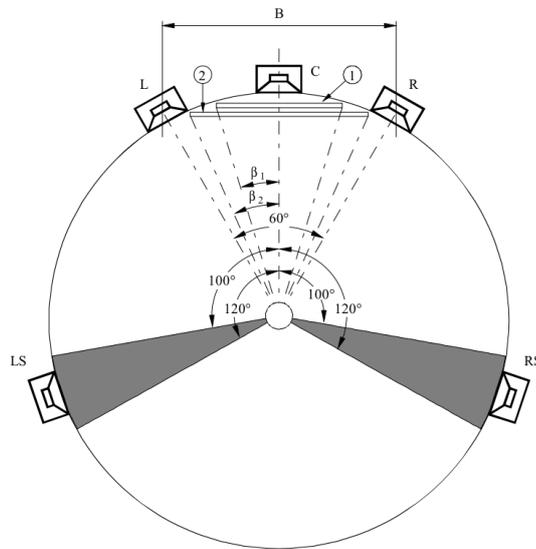


Abb. 3.2.1: 5.1 Lautsprecher Anordnung. In: ITU-Rec., *ITU-R BS.775-1*, 3

3.2.2.2 5.1-Surround

Der 5.1-Surround Standard ist momentan das Referenz-System und wird in *ITU-R BS.775-1* näher spezifiziert. Dieses basiert auf fünf getrennten Kanälen, welche L, C, R sowie die Surround-Kanäle LS (Left Surround) und RS (Right-Surround) übertragen. Außerdem können auf einem optionalen Kanal (LFE) tieffrequente Effekte übertragen werden. Um die Kompatibilität für alle Anwendungen beizubehalten, sollten die Lautsprecher stets in der in Abbildung 3.2.1 zu sehenden Anordnung aufgestellt werden. L und R sind dabei wie bei Stereo mit $\pm 30^\circ$ angeordnet, LS und RS stehen in einem Winkel von $\pm 100^\circ$ bis $\pm 120^\circ$. Der Betrachtungsabstand hängt dabei von der Bildhöhe ab. Können die Lautsprecher nicht, wie im Standard vorgesehen, auf einem Kreisbogen aufgestellt werden, so können die drei Frontlautsprecher auch auf einer Linie aufgestellt werden. Der Center-Lautsprecher wird dann entsprechend verzögert. Dies ist auch für die Surround Lautsprecher möglich, falls hinter dem Hörer nicht genügend Platz zur Verfügung steht.¹²

Um Abwärtskompatibilität zu gewährleisten, gibt es zwei Möglichkeiten. Entweder wird neben dem 5.1 Signal auch ein Stereo-Signal übertragen oder die 5.1-Kanäle

12. Vgl. Theile u. a., „Tonaufnahme und Tonwiedergabe“, 279-278.

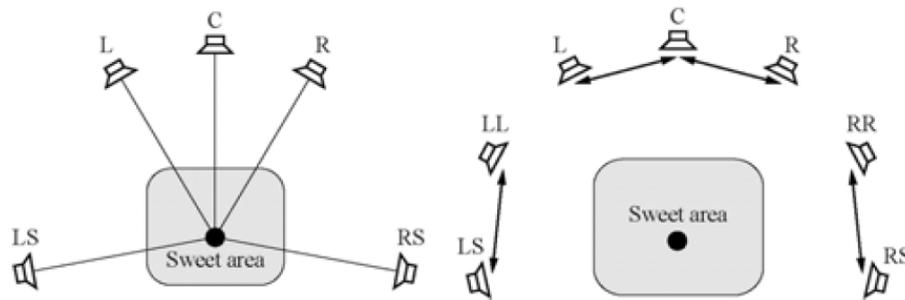


Abb. 3.2.2: 5.1- sowie 7.1-Surround Lautsprecher Anordnung und Sweet Area. In: Theile u. a., „Tonaufnahme und Tonwiedergabe“, 281

werden mittels eines Matrixverfahrens auf Stereo umgerechnet.¹³

3.2.2.3 7.1-Surround

Beim 7.1-Surround Standard wird die 5.1 Anordnung um weitere zwei Lautsprecher LL sowie RR ergänzt. Dies sorgt für eine bessere Lokalisation bei seitlichen Ereignissen, sowie einen etwas vergrößerten *Sweet Area*, welche in Abbildung 3.2.2 zu sehen ist.¹⁴

3.2.3 Neue Möglichkeiten durch Mehrkanal-Stereophonie

Durch die Mehrkanal-Stereophonie entstehen bei der Wiedergabe verschiedene neue Möglichkeiten, welche im folgenden Abschnitt näher dargestellt werden sollen. Dabei soll es hierbei hauptsächlich um die Vorteile bei der Wiedergabe von Musik gehen. Dabei spielt es erst einmal keine Rolle welcher Surround Standard eingesetzt wird, wobei mit zusätzlichen Kanälen die positiven Eigenschaften besser ausgeschöpft werden können.

13. Vgl. ITU-Rec., *ITU-R BS.775-1: Multichannel stereophonic sound system with and without accompanying picture*, 1992/1994, 6-8, besucht am 21. August 2019, https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bs/R-REC-BS.775-1-199407-S!!PDF-E.pdf.

14. Vgl. Theile u. a., „Tonaufnahme und Tonwiedergabe“, 281-282.

3.2.3.1 Künstlerische Möglichkeiten

Die Schallquellen können bei Surround im Gegensatz zu Stereo auch um den Hörer herum positioniert werden. Hierdurch werden z.B. Bewegungen von Schallquellen um den Hörer herum möglich. Die zusätzlichen Kanäle ermöglichen außerdem eine größere Räumlichkeit bei Aufnahmen, welche mit entsprechenden Mikrofon-Anordnungen erstellt, oder mit künstlichem Surround-Hall versehen wurden. Da der Schall den Hörer auch seitlich erreicht, entsteht der Eindruck von räumlicher Tiefe und Umhüllung.¹⁵

Schallquellen welche aus dem Bezug eines Lautsprecherpaares entstehen wie z.B. L-LS oder R-RS können zwar den Raumeindruck fördern, sind jedoch im Bezug auf die Ortung nicht stabil. Dies lässt sich vor allem auf den großen Öffnungswinkel zwischen den Lautsprechern zurückführen.¹⁶ Vor allem im Live-Bereich, wo die Abstände zwischen vorderen und hinteren Lautsprechern sehr groß sein können und damit viele Personen außerhalb der *Sweet Area* stehen, macht sich dieser Effekt bemerkbar. Surround bietet sich hier vor allem für die Erhöhung der Räumlichkeit an. Da es bei Live-Veranstaltungen durch die Gefahr von Rückkopplungen schwierig ist, eine Surround-Mikrofonanordnung zu verwenden und in vielen Fällen auch keine geeignete Räumlichkeit aufgenommen werden kann, bietet sich hier vor allem die Verwendung von künstlich erzeugtem Nachhall an.

3.2.3.2 Technische Möglichkeiten

Neben den künstlerischen Möglichkeiten gibt es auch den Vorteil, dass Schallquellen innerhalb der L-C-R-Ebene besser geortet werden können. Dies lässt sich auf den zusätzlichen Center-Lautsprecher zurückführen, wodurch Schallquellen in der Mitte der Basis nun nicht mehr als Phantomschallquellen erzeugt werden müssen, sondern über einen eigenen Lautsprecher ausgegeben werden können. Dies lässt sich auch im Live-Bereich nutzen, um für Hörer außerhalb der *Sweet Area* die Ortung zu verbessern.¹⁷

15. Vgl. Theile u. a., „Tonaufnahme und Tonwiedergabe“, 293-295.

16. Vgl. ebd., 293-296.

17. Vgl. ebd.

In diesem Abschnitt wurde zunächst gezeigt, dass Surround wie auch die Zweikanal-Stereofonie mit der Phantomschallquellenbildung arbeitet um Schallquellen zwischen den Lautsprechern abzubilden. Danach wurde ein kurzer Überblick über die verschiedenen Surround-Standards gegeben und gezeigt, wie die zusätzlichen Kanäle genutzt werden können um Schallereignisse auch um den Hörer herum zu positionieren und die Räumlichkeit bei der Wiedergabe zu erhöhen. Vor allem die Erhöhung der Räumlichkeit ist für die Beschallung von Veranstaltungen interessant. Hier können z.B. durch digital erzeugten Nachhall die erforderlichen Reflexionsmuster erzeugt werden. Neben der Erhöhung der Räumlichkeit bietet Surround eine bessere Ortung von Schallquellen welche sich zwischen L-C-R befinden. Dies kann in der Beschallung von Vorteil sein, wo sich ein Großteil des Publikums außerhalb der *Sweet Area* befindet.

4 3D-Beschallungskonzepte

Im folgenden Abschnitt wird ein Überblick über die Wellenfeldsynthese als dreidimensionales Beschallungskonzept gegeben. Bereits in den 1970er Jahren gab es durch die Einführung von Surround erste Versuche, mittels mehrerer Lautsprecher, ein räumliches Klangerlebnis für den Hörer zu schaffen. Dabei kann das Ziel z.B. bei der reinen Wiedergabe einer Aufnahme sein, das Schallfeld des Originalschauplatzes möglichst exakt zu reproduzieren. Im Bereich der Beschallung kann z.B. ein ähnlicher Ansatz verfolgt werden, indem dieser Raumeindruck durch künstlich erzeugten Nachhall entsteht.

Auch kann hierdurch ein Schallfeld erzeugt werden, welches weitestgehend unabhängig von der Position des Hörers eine eindeutige Ortung von Schallquellen erlaubt und damit besser für ein großes Publikum geeignet ist als herkömmliche Stereobeschallung.

4.1 Wellenfeldsynthese

Anders als die bisher beschriebenen Beschallungskonzepte, welche auf der Bildung von Phantomschallquellen beruhen, arbeitet die WFS mit der Synthese von Wellenfronten aus verschiedenen Elementarwellen. Dies ermöglicht eine Schallquelle nicht nur am Rand der von den Lautsprechern aufgespannten Fläche zu lokalisieren, sondern auch außerhalb davon, oder sogar in ihrem Inneren. Der folgende Abschnitt gibt zunächst einen Überblick über die geschichtliche Entwicklung und die Funktionsweise der WFS. Anschließend werden die Anforderungen an ein solches System aufgezeigt, sowie die verschiedenen erhältlichen Systeme vorgestellt. Zuletzt wird anhand des Hörsaals *H 104* an der *TU Berlin* die Anwendung in der Praxis gezeigt.

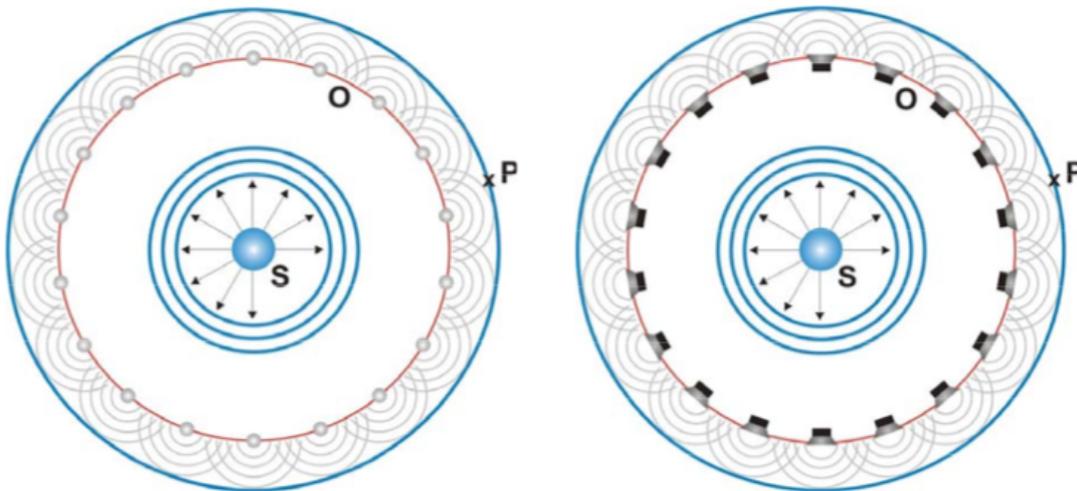


Abb. 4.1.1: Huygens-Fresnel-Prinzip: Theoretisches Modell (links), Anwendung WFS (rechts) in: Theile, Wittek und Reisinger, *Wellenfeldsynthese-Verfahren*, 5

4.1.1 Funktionsweise

4.1.1.1 Huygens-Fresnel'sches Prinzip

Die WFS basiert auf dem *Huygens-Fresnel'schen Prinzip*, welches von den gleichnamigen Physikern Christiaan Huygens und Augustin-Jean Fresnel entwickelt wurde. Dieses besagt, dass sich „[...] jeder Punkt einer Wellenfront als Ausgangspunkt einer neuen, sich kugelförmig ausbreitenden *Elementarwelle* oder *Sekundärwelle* betrachtet werden. Die weitere Ausbreitung der Wellenfront ergibt sich dann als äußere Einhüllende dieser sich überlagernden Elementarwellen.“¹ Bei der WFS werden nun die einzelnen Punktquellen durch Lautsprecher ersetzt, welche in Abbildung 4.1.1 nun wieder eine Kugelwelle erzeugen.²

1. Slavik und Weinzierl, „Wiedergabeverfahren“, 665.

2. Günther Theile, Helmut Wittek und Markus Reisinger, *Wellenfeldsynthese-Verfahren: Ein Weg für neue Möglichkeiten der räumlichen Tongestaltung* (Institut für Rundfunktechnik GmbH, 2002), 5-6, besucht am 16. August 2019, https://hauptmikrofon.de/theile/2002-3_WFS_22.TMT-2002.pdf.

4.1.1.2 Kirchhoff-Helmholtz-Integral

Die mathematische Beschreibung für die Signale der Sekundärquellen erfolgt über das Kirchhoff-Helmholtz-Integral (Gleichung (4.1)). Dieses besagt, dass der Schalldruck innerhalb eines quellfreien Raumvolumens V eindeutig durch Schalldruck- und Schnelle auf der das Volumen umschließenden Fläche S definiert ist.

$$p_A = \frac{1}{4\pi} \int_S \left[\left(p \frac{1 + jkr}{r} \underbrace{\cos \varphi \frac{e^{-jkr}}{r}}_{\text{Dipol}} \right) + \left(j\omega \rho_0 v_n \underbrace{\frac{e^{jkr}}{r}}_{\text{Monopol}} \right) \right] dS \quad (4.1)$$

Der Schalldruck $p_A(r)$ am Hörerplatz A ergibt sich damit aus der Summe des sich dipolförmig von jedem Punkt auf S zum Hörer ausbreitenden Schallsignalen und den durch die Schallschnelle der Primärquelle angetriebenen monopolartigen Schallsignalen an dieser Stelle.³

Vereinfacht gesagt, lässt sich also durch Kenntnis von Schalldruck und Schallschnelle am Rand eines Raumvolumens der Schalldruck an einer beliebigen Stelle ermitteln. Bei der WFS wird die Fläche, welche das Raumvolumen umschließt, durch das Lautsprecherarray gebildet. Für die Synthese einer Schallquelle müssen also Schalldruck und -Schnelle auf der Oberfläche gemessen werden. Dies kann mittels Mikrofonen (Druck- und Gradientenempfänger) erfolgen oder durch ein virtuelles Schallfeld, wie es z.B. bei künstlichen Hall zum Einsatz kommt.⁴

Für die Realisierung dieses Ansatzes müsste die gesamte Oberfläche eines Volumens mit Lautsprechern bestückt werden, üblich sind hier mehr als hundert Lautsprecher. Außerdem muss der Raum reflexionsfrei sein. Da dies in der Praxis kaum umzusetzen ist, werden einige Anpassungen vorgenommen. Zum einen wird auf die Anordnung der Schallquellen auf der kompletten Oberfläche verzichtet. Statt dessen konzentriert

3. Vgl. Slavik und Weinzierl, „Wiedergabeverfahren“, 666-667; vgl. Rafael Philip Ludwig, „Wellenfeldsynthese für Eventbeschallungen“ (Bachelorarbeit, Institut für Signalverarbeitung und Sprachkommunikation der Technischen Universität Graz, 2012), 9, besucht am 16. August 2019, https://www2.spsc.tugraz.at/www-archive/downloads/BA_Ludwig_Wellenfeldsynthese_f%c3%bc_r_Eventbeschallungen.pdf.

4. Vgl. Slavik und Weinzierl, „Wiedergabeverfahren“, 666-667.

man sich auf eine (meist horizontale) Ebene innerhalb des Raumes. Dies ist durch die höhere Lokalisationsschärfe des Gehörs in der horizontalen Ebene begründet und reduziert außerdem deutlich den erforderlichen Rechenaufwand, sowie die erforderliche Anzahl von Lautsprechern. Außerdem wird auf die Verwendung von Monopol- und Dipolquellen verzichtet, da reale Lautsprecher meist eine annähernd monopolförmige Richtcharakteristik besitzen. Zuletzt kann in der Praxis keine unendlich dichte Anordnung der Lautsprecher erfolgen, da diese über bestimmte Abmessungen verfügen.⁵

Da die Beschreibung des Schallfelds sich nun auf eine Ebene beschränkt und nur Monopolstrahler zum Einsatz kommen, kann die mathematische Beschreibung nun vereinfacht werden. Die Beschreibung wird nach dem Physiker Baron Rayleigh als Rayleigh-Integral bezeichnet und liefert für kugelförmige Sekundärquellen den Schalldruck p_{synth} durch folgendes Integral:⁶

$$p_{\text{synth}} = \int_{-\infty}^{\infty} Q_m(x, \omega) \frac{\exp(-jk\Delta r)}{\Delta r} dx \quad (4.2)$$

Q_m ist dabei das Signal der Sekundärquellen mit:

$$Q_m(x, \omega) = S_{\text{PQ}}(\omega) \sqrt{\frac{jk}{2\pi}} \sqrt{\frac{\Delta z_0}{z_0 + \Delta z_0}} \cos \varphi \frac{\exp(-jkr_{\text{PS}})}{\sqrt{r_{\text{PS}}}} \quad (4.3)$$

S_{PQ} = Signal der Primärquelle

r_{PS} = Abstand Primärquelle-Sekundärquelle [m]

φ = Winkel gegenüber dem Normalenvektor des Lautsprecher-Arrays [°]

z_0 = Verhältnis des Abstands Primärquelle-Sekundärquelle

Δz_0 = Verhältnis des Abstands Sekundärquelle-Hörer

5. Vgl. Slavik und Weinzierl, „Wiedergabeverfahren“, 667-668.

6. Vgl. ebd., 668.

4.1.2 Probleme

4.1.2.1 Rechenaufwand

Da bei WFS jedes Lautsprechersignal individuell berechnet werden muss, ist bei der großen Anzahl benötigter Lautsprecher ein ausreichend dimensioniertes Rechencluster erforderlich. So kommen beim WFS-System der TU-Berlin beispielsweise 16 Rechner zum Einsatz, welche die benötigten 832 Lautsprechersignale berechnen.⁷

4.1.2.2 Spatial Aliasing

Für die korrekte Reproduktion des Schallfelds sollten die Lautsprecher möglichst keinen Abstand zueinander haben. Da dies in der Praxis aufgrund der Gehäuse- und Membranabmessungen nicht umsetzbar ist, kommt es ab einer gewissen Frequenz zu räumlichen und spektralen Verzerrungen, welche als *Spatial Aliasing* bezeichnet werden. Für die Synthese von ebenen Schallwellen mittels eines linearen Lautsprecherarrays tritt Spatial Aliasing oberhalb von f_0 auf, welche sich wie folgt berechnet:⁸

$$f_0 = \frac{c}{\Delta x (1 + |\cos \alpha_{PW}|)} \quad (4.4)$$

c = Schallgeschwindigkeit [m/s]

Δx = Lautsprecherabstand [m]

α_{PW} = Einfallswinkel der ebenen Welle relativ zur Richtung des Lautsprecherarrays [°]

Abbildung 4.1.2 zeigt eine Simulation der durch Spatial Aliasing hervorgerufenen Störungen. Nach Gleichung (4.4) liegt die Grenzfrequenz bei 2293 Hz. Für eine Frequenz

⁷ Vgl. ebd., 670.

⁸ Vgl. Anselm Goertz u. a., *Zur Entzerrung von Lautsprechersignalen für die Wellenfeldsynthese*, Paper zur 25. Tonmeistertagung (Institut für Akustik und Audiotechnik, 2008), 2, besucht am 17. August 2019, <http://www.ifaa-akustik.de/files/TMT-2008-Goertz-Makarski-Weinzierl-Moldrzyk.pdf>; vgl. Slavik und Weinzierl, „Wiedergabeverfahren“, 668-669.

von 1600 Hz ist demnach eine Synthese ohne Aliasing im gesamten Hörbereich möglich (links im Bild). Für 3200 Hz entstehen in der Nähe des Arrays Verzerrungen und für 6400 Hz erreichen die Störungen auch das Hintere der Hörfläche. Das Resultat sind kammfilterartige Einbrüche im Frequenzgang oberhalb der Grenzfrequenz. Dies kann durch Vorentzerrung der Quellsignale, Einsatz eines zu den Frequenzgängen in Abbildung 4.1.2 inversen Filters innerhalb des WFS Renderings, oder Einsatz von FIR- oder IIR-Filtern bei DSP gesteuerten Lautsprechern reduziert werden.⁹

4.1.2.3 Beugungseffekte, Endeffekte

Die Sekundärquellen weisen in der Praxis meist eine unstetige Verteilung auf, da z.B. Aussparungen für Türen etc. im Array erforderlich sein können, oder das Lautsprecherarray nicht rings um den Publikumsbereich herum geht. Dies führt an den Kanten des Arrays zu Beugungseffekten (engl. *Truncation Effects*). Bei der Synthese einer ebenen Welle geht diese beispielsweise an den Kanten in eine Kugelwelle über (siehe Abbildung 4.1.3). Dieser Effekt tritt auch bei geradlinigen Verteilungen von Lautsprechern, welche in unterschiedlichem Winkel aufeinander treffen auf, wie z.B. in Raumecken.¹⁰

Zur Reduzierung dieser Effekte gibt es zwei Lösungen:

Einerseits kann an den Kanten des Arrays eine zusätzliche punktförmige Sekundärquelle angebracht werden, deren Signal sich nach Gleichung (4.5) berechnet. Zur Veranschaulichung der Parameter siehe Abbildung 4.1.4. Durch diese Methode können die Beugungswellen im bis zu 15 dB reduziert werden, führt jedoch außerhalb des Rekonstruktionsbereichs zu einer Verschlechterung der Situation. Das Resultat ist links in Abbildung 4.1.5 zu sehen.¹¹

$$Q_m(r_{\text{edge}}, \omega) = S(\omega) \sqrt{\frac{1}{2\pi jk}} \sqrt{\frac{\Delta z_0}{z_0 + \Delta z_0}} \frac{\cos \varphi_{\text{edge}}}{\sin \varphi_{\text{edge}} - \sin \beta_0} \frac{\exp(-jkr_{\text{edge}})}{\sqrt{r_{\text{edge}}}} \quad (4.5)$$

9. Vgl. Goertz u. a., *Lautsprechersignale für Wellenfeldsynthese*, 3-4.

10. Vgl. Edwin Verheijen, „Sound Reproduction by Wave Field Synthesis“ (Doktorarbeit, TU Delft, 1998), 50-53, besucht am 17. August 2019, <http://resolver.tudelft.nl/uuid:9a35b281-f19d-4f08-bec7-64f6920a3821>.

11. Vgl. ebd., 50-53.

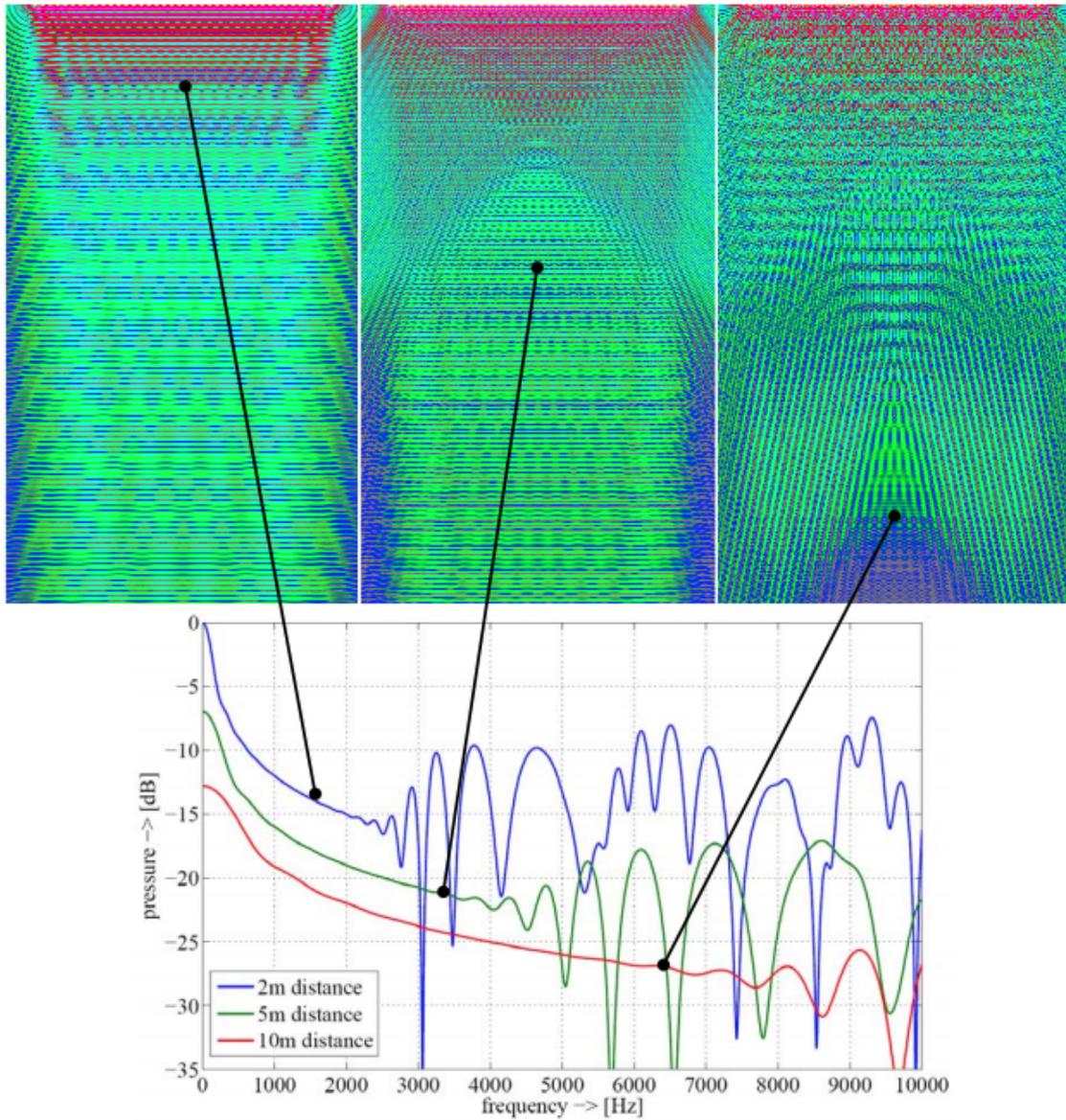


Abb. 4.1.2: Simulation der räumlichen und spektralen Störung durch *Spatial Aliasing*. $\Delta x = 15$ cm, $f = 1600$ Hz (links), $f = 3200$ Hz (mitte), $f = 6400$ Hz (rechts). Unten: resultierende Übertragungsfunktionen für unterschiedliche Abstände vom Array. In: Goertz u. a., *Lautsprecher-synthese für Wellenfeldsynthese*, 3

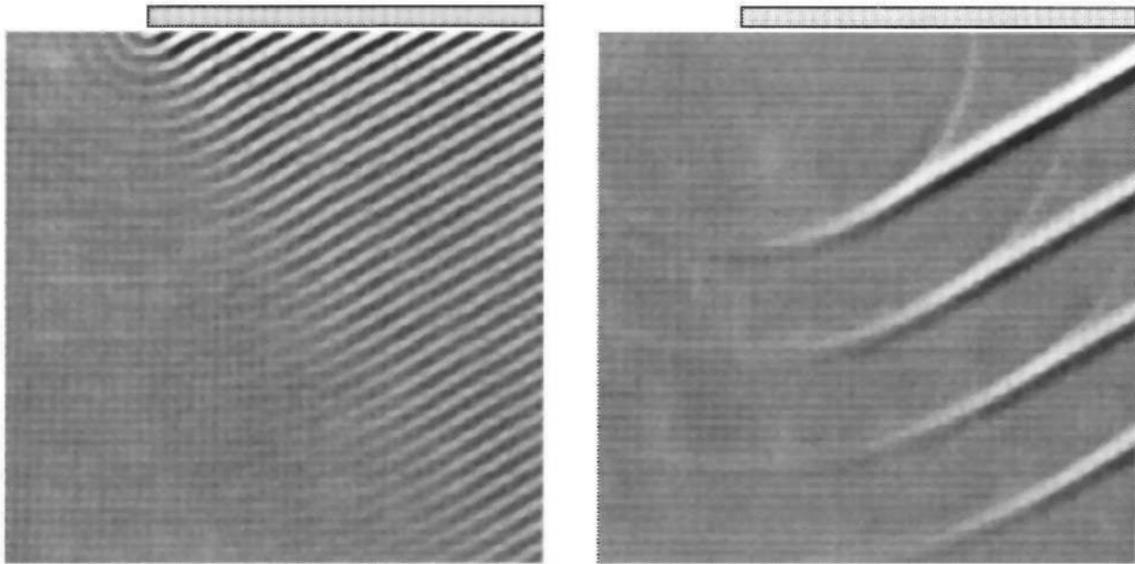


Abb. 4.1.3: Beugungseffekte bei einer weit entfernten synthetisierten Schallquelle; links: Signal mit gleichbleibender Wellenlänge, rechts: wiederholter Puls. In: Verheijen, „Wave Field Synthesis“, 51

r_{edge} = Entfernung der Primärquelle zur Kante [m]

φ_{edge} = Winkel der Primärquelle zur Kante [°]

β_0 = Fester Winkel für die optimale Kompensation der Beugungseffekte [°]

Die zweite Methode, welche als *Tapering* bezeichnet wird, arbeitet mit einer cosinusförmigen Reduzierung der Signalamplituden zur Kante hin. Bei einer Reduzierung über eine Breite von 1 m kann beispielsweise eine Reduzierung der Beugungswellen um 6 dB bis 10 dB erreicht werden (rechts in Abbildung 4.1.5).¹²

4.1.3 Vergleich zu herkömmlichen Beschallungskonzepten

Wie im letzten Abschnitt gezeigt wurde ist die WFS ein sehr komplexes System, welches im Vergleich zu den anderen bisher vorgestellten Beschallungskonzepten jedoch verschiedene Vorteile mit sich bringt. Hierzu gehört vor allem die korrekte Lokalisation der Schallquellen, welche weitestgehend unabhängig von der Position des Hörers ist. Dies kann vor allem bei der Beschallung von Großveranstaltungen

¹². Vgl. Verheijen, „Wave Field Synthesis“, 50-53.

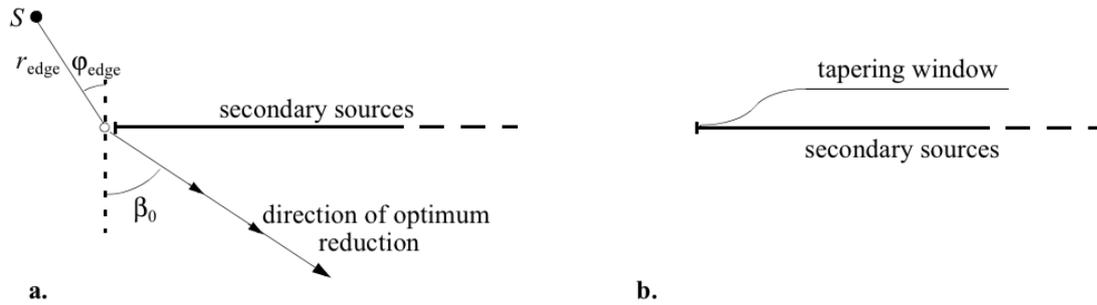


Abb. 4.1.4: Reduzierung von Beugungseffekten. **a.** Monopolförmige Schallquelle an der Kante des Arrays. **b.** Cosinusförmige Reduzierung der Amplitude des Signals der Sekundärquellen. In: Verheijen, „Wave Field Synthesis“, 52

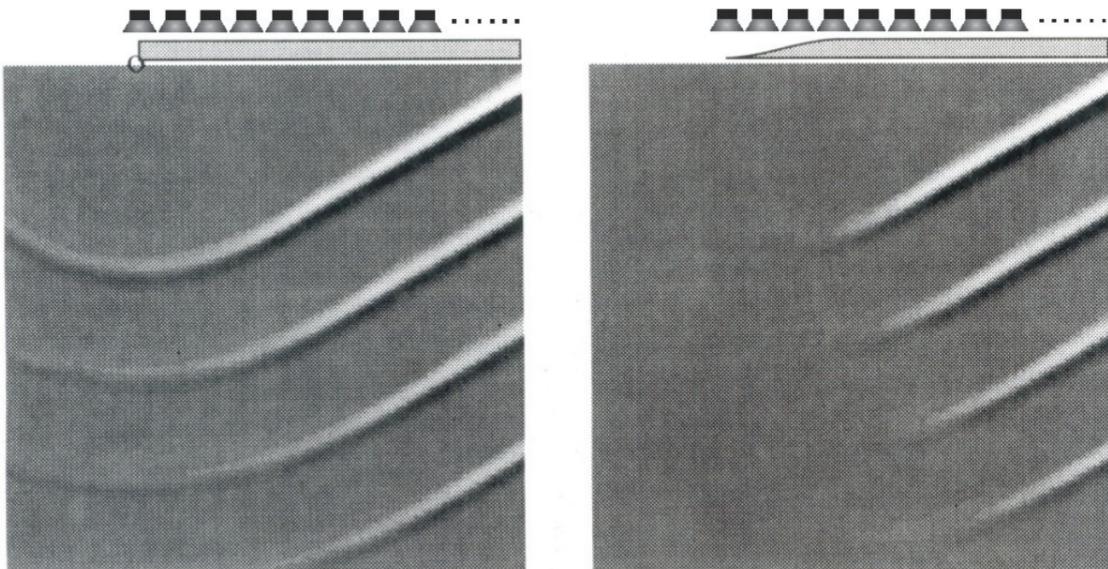


Abb. 4.1.5: Reduzierung von Beugungseffekten durch: Punktquelle mit unterschiedlicher Frequenzabhängigkeit im Punkt O (links); Cosinus-förmige Absenkung der Amplitude zur Kante hin (rechts). In: Verheijen, „Wave Field Synthesis“, 52

nützlich sein, bei denen sich normalerweise ein Großteil des Publikums außerhalb des *Sweet Spots* befindet und die Schallquellen daher nicht korrekt orten kann. Im folgenden Abschnitt wird hierauf genauer eingegangen und außerdem einige weitere Vorteile der WFS gegenüber anderen Beschallungskonzepten aufgezeigt.

4.1.3.1 Lokalisation

Da herkömmliche Verfahren wie die Stereophonie mit Hilfe der Phantomschallquellenortung arbeiten um Schallquellen zwischen den Lautsprechern zu positionieren, ist die korrekte Lokalisation der Schallquellen auf einen kleinen Bereich, den *Sweet Spot*, begrenzt. Bewegt sich der Hörer aus diesem heraus, werden die Pegel- bzw. Laufzeitdifferenzen zwischen den Lautsprechern so groß, dass die Schallquelle nicht mehr korrekt geortet werden kann.

Die WFS bietet im Gegensatz hierzu die Möglichkeit ein Schallfeld zu erzeugen, welches eine Schallquelle an der jeweiligen Position tatsächlich erzeugen würde. Dadurch erfolgt die Lokalisation, wie auch bei natürlichen Schallquellen, durch Summenlokalisierung und Präzedenzeffekt. Dies führt dazu, dass die Schallquelle innerhalb der Hörfläche nahezu unabhängig von der Position korrekt geortet werden kann.¹³ Zur Veranschaulichung ist in Abbildung 4.1.6 der *Sweet Spot* bei einer 5.1 Surround Beschallung, sowie der *Sweet Spot* bei WFS mit einem den gesamten Raum umschließenden Array zu sehen.

4.1.3.2 Quellen in der Hörzone

Bei der herkömmlichen Mehrkanalwiedergabe gibt es lediglich die Möglichkeit Schallquellen auf der Ebene der Lautsprecher, bzw. im dahinter liegenden Raum zu positionieren. Da bei WFS jedoch ein beliebiges Schallfeld synthetisiert werden kann, ist es auch möglich die Schallquellen vor der Lautsprecherebene, also innerhalb der Hörfläche zu positionieren.¹⁴

13. Vgl. Andreas Friesecke, *Die Audio-Enzyklopädie: Ein Nachschlagewerk für Tontechniker*, 2. Aufl. (Berlin: De Gruyter Saur, 2014), 148-149, doi:10.1515/9783110340181.

14. Vgl. Görne, *Tontechnik*, 309.

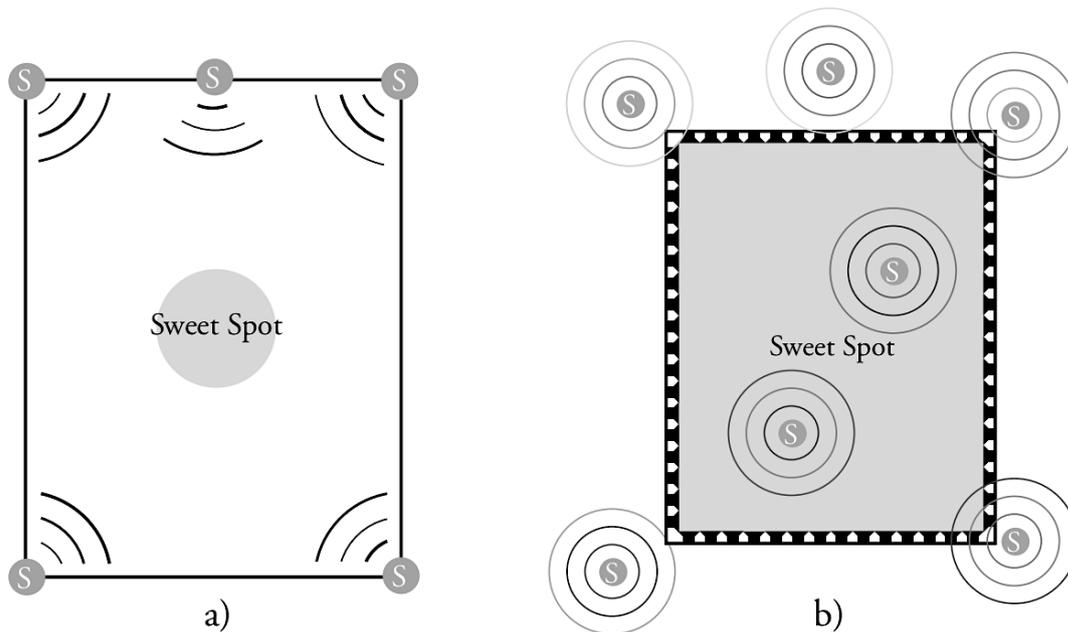


Abb. 4.1.6: Sweet Spot bei a) 5.1-Surround und b) WFS. In: Ion, „Klangfeldsynthese“, 9

Die Positionierung ist lediglich durch die Ausdehnung des Arrays und den dadurch entstehenden Beugungseffekten begrenzt. Laut Verheijen lässt sich der Hörbereich grafisch abschätzen, indem man Linien von den Kanten des Arrays durch die Position der virtuellen Quelle zieht (siehe Abbildung 4.1.7).

4.1.3.3 Erzeugung ebener Wellen

Neben der Erzeugung von Punktquellen ist auch die Synthese von ebenen Wellen möglich, falls sich das Array auch in die Vertikale ausbreitet. Diese entstehen durch die abnehmende Krümmung der Wellenfront in großer Entfernung von punktförmigen Schallquellen. Ein Anwendungsfall hierfür ist u.A. die Erzeugung einer Atmosphäre, welche durch mehrere ebene Wellen ein diffuses Schallfeld erzeugt. In der Praxis lässt sich dies beispielsweise nutzen um eine Gewitter-Atmosphäre zu schaffen, bei der Donner durch ebene Wellen aus großer Entfernung zu kommen scheint und die Regentropfen als fokussierte Quellen (Schallquellen innerhalb des Hörbereichs), mit

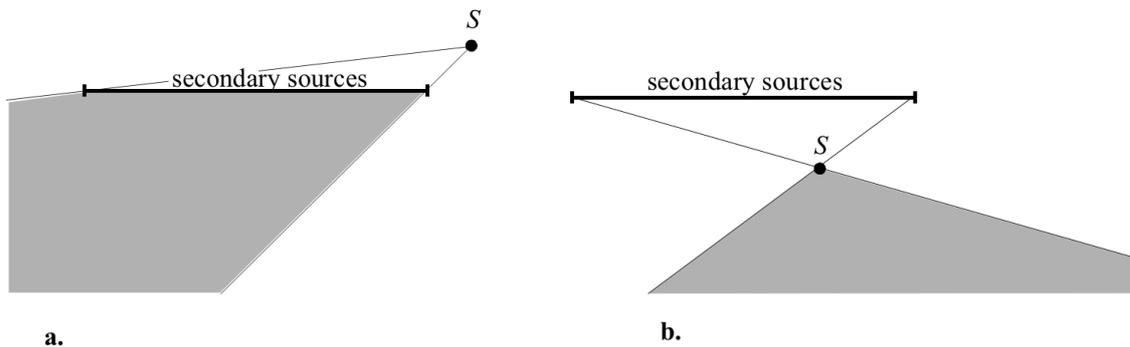


Abb. 4.1.7: Hörbereich bei WFS. **a.** Quelle hinter dem Array **b.** Quelle vor dem Array. In: Verheijen, „Wave Field Synthesis“, 50

zufälliger Positionierung innerhalb der Hörfläche, auf den Boden auftreffen.¹⁵

4.1.3.4 Raumanteil

Im Gegensatz zur Stereophonie werden für die WFS Signale mit möglichst wenig Raumanteil benötigt. Die Rauminformation wird mittels spezieller Mikrofonarrays gemessen und als Impulsantwort getrennt übertragen. Bei der Wiedergabe werden die trockenen Signale mit der Impulsantwort gefaltet. Dies bietet den Vorteil, dass der Raumanteil flexibel gesteuert werden kann, und sich der Raum sogar durch einen anderen Raum ersetzen lässt. Die gängigen Systeme bieten hierfür eine Datenbank mit Impulsantworten verschiedener Veranstaltungsorte wie z.B. Konzertsälen.¹⁶

4.1.4 Erhältliche Systeme

Nachfolgend soll ein kurzer Überblick über die gängigen Systeme für WFS gegeben und deren Eigenschaften dargestellt werden.

15. Vgl. Alexandra Ion, „Klangfeldsynthese: Betrachtung der Klangfeldsynthese anhand des IOSONO Systems“ (Bachelorarbeit, Fachhochschule Oberösterreich, 2009), 10, besucht am 19. August 2019, http://alexandraion.com/wp-content/uploads/BachelorsThesis_AlexandraIon.pdf.

16. Vgl. Theile, Wittek und Reisinger, *Wellenfeldsynthese-Verfahren*, 7-8.

4.1.4.1 SpatialSound Wave

Das erste System ist *SpatialSound Wave* welches vom *Fraunhofer Institut für digitale Medientechnologie (IDMT)* entwickelt wurde. Das IDMT betreibt schon lange Forschung im Gebiet der WFS und hat dessen Entwicklung in Zusammenarbeit mit verschiedenen Universitäten stark beeinflusst.

SpatialSound Wave ist ein auf WFS basierendes System, welches allerdings mit deutlich weniger Lautsprechern zurecht kommen soll. Da hierdurch die Kosten für Lautsprecher, die zur Berechnung der Signale erforderlichen Rechner, Transport und Installation deutlich sinken, wird das System für einen größeren Kundenkreis interessant. Der Abstand der Lautsprecher sollte für dieses System maximal dem Abstand Lautsprecher-Hörer entsprechen. Dies führt dazu, dass die Lokalisation im Vergleich zu einem geringeren Lautsprecherabstand schlechter wird, jedoch immer noch besser ist, als bei herkömmlichen Mehrkanalsystemen. Soll das System auch für die Veränderung des Raumklangs genutzt werden, sollten die Lautsprecherabstände jedoch geringer sein.¹⁷

SpatialSound Wave kann auch durch zusätzliche Lautsprecher oberhalb des Arrays in die Vertikale erweitert werden, worauf bei der herkömmlichen WFS meist aufgrund der enormen Kosten verzichtet wird. Da die Lokalisationsschärfe in der Medianebene deutlich ungenauer ist ($\pm 10^\circ$ gegenüber $\pm 4^\circ$) können hier auch mit weniger Lautsprechern befriedigende Ergebnisse erzielt werden. Auch eine Einbindung in eine konventionelle L/R-Beschallung oder komplexere Systeme mit Delaylines ist möglich.¹⁸

Mittels Dante oder MADI lassen sich 16 Quellen als virtuelle Objekte im Raum positionieren, weitere 16 Quellen können für die Raumsimulation genutzt werden. Ausgangsseitig lassen sich bis zu 64 Kanäle berechnen. Die Steuerung des Systems

17. Vgl. Production Partner - Fachmagazin für Veranstaltungstechnik, „3D Sound mit SpatialSound Wave“, 2016, besucht am 19. August 2019, <https://www.production-partner.de/story/3d-sound-mit-spatialsound-wave/>.

18. Vgl. Fraunhofer Institut für digitale Medientechnologie IDMT, „SpatialSound Wave“, 2017, besucht am 19. August 2019, https://www.idmt.fraunhofer.de/content/dam/idmt/documents/IL/spatialsound_wave_de.pdf.

erfolgt über ein browserbasiertes Interface in welchen sich das System konfigurieren, sowie die Positionierung der Objekte im Raum einstellen lässt.¹⁹

4.1.4.2 IOSONO

IOSONO ist ein WFS-System welches vom der gleichnamigen Unternehmen *Iosono GmbH* in Zusammenarbeit mit dem *IDMT* entwickelt wurde. 2014 wurde die *Iosono GmbH* von *Barco NV* aufgekauft.²⁰

Im Gegensatz zu *SpatialSound Wave* ist *IOSONO* für den Einsatz mit mehr Lautsprechern ausgelegt. Die Berechnung der Signale erfolgt mittels *IOSONO CORE* Rechner, welcher 128 Eingangs- und Ausgangskanäle unterstützt. Über die *IOSONO CORE extension* können in 128 Kanal-Schritten quasi unbegrenzt viele Kanäle hinzugefügt werden, wodurch sich auch hochkomplexe WFS-Systeme steuern lassen. Dabei ist auch der Betrieb von Lautsprechern in der vertikalen Ebene möglich. Auch herkömmliche Mehrkanalformate lassen sich nahtlos in ein *IOSONO*-System integrieren. Für diese werden dann die Lautsprecher als virtuelle Quellen im Raum positioniert. Die Steuerung erfolgt entweder über Fernsteuerungs-Software oder über ein DAW-Plugin und lässt sich auch über Timecode automatisieren.²¹

4.1.4.3 sonic emotion

sonic emotion ist ein Schweizer Unternehmen welches neben einem WFS-System für Heimanwender mit dem *Sonic Wave 1* auch ein WFS-System für den professionellen Gebrauch entwickelt hat. Dieses kann über *MADI 32* Eingangs- und 64 Ausgangskanäle verwalten. Die Steuerung erfolgt über zwei getrennte Softwaremodule: *Wave Designer* zum Einrichten des Systems, sowie *Wave Performer* für die

19. Vgl. Production Partner - Fachmagazin für Veranstaltungstechnik, „3D Sound mit SpatialSound Wave“.

20. Vgl. Barco Audio Technologies, „IOSONO joining Barco“, 2014, besucht am 19. August 2019, <http://www.iosono-sound.com/news/detailansicht/iosono-joining-barco/>.

21. Vgl. Barco Audio Technologies, „IOSONO CORE: Audio processor for immersive sound experiences“, 2016, besucht am 19. August 2019, http://www.iosono-sound.com/fileadmin/user_upload/pdf/IOSONO_CORE-specifications.pdf.

Positionierung von Quellen. *sonic motion* behauptet durch eigens entwickelte Algorithmen die erforderliche Anzahl der Lautsprecher auf ein zehntel des theoretischen Ansatzes reduzieren zu können. Auch herkömmliche Mehrkanalformate lassen sich in das System integrieren, welches anhand von Pegel- und Phasendifferenzen die Position der Schallquellen im Raum ermittelt und sie als virtuelle Quellen über WFS wiedergibt.²²

4.1.5 Anwendung am Beispiel H104 der TU-Berlin

Um die Realisierung eines WFS-Systems in der Praxis zu veranschaulichen, wird an dieser Stelle kurz das WFS-System im Hörsaal *WellenFeld H 104* der *TU-Berlin* vorgestellt (Abbildung 4.1.8). Der Hörsaal umfasst 644 Sitzplätze auf einer Fläche von 3200 m². Im Vorfeld wurde die Nachhallzeit auf ca. 1 s gesenkt um die theoretische Voraussetzung des quellfreien Volumens bestmöglich zu erfüllen. Als Lautsprecher kommen hier eigens entwickelte Lautsprechermodule (Abbildung 4.1.9) zum Einsatz, welche jeweils über 24 Mittelhochtöner und 2 Tieftöner verfügen und einen engen vertikalen Öffnungswinkel aufweisen um Decken- und Bodenreflexionen zu minimieren. Diese wurden auf einem nahezu den kompletten Hörsaal umlaufenden Band mit 86 m Länge angebracht. Da der Abstand zwischen den Mittelhochtönern lediglich 10 cm beträgt, tritt Spatial Aliasing erst bei Frequenzen ≥ 3440 Hz auf. Für die Schallfeldsynthese kommt ein linuxbasiertes Rechnercluster zum Einsatz, welches die eigens entwickelte Software *sWonder* ausführt und die 832 Lautsprechersignale berechnet.²³

Um die Schalldruckpegel im Raum voraussagen zu können, wurde das System im Vorfeld mit der Software *EASE 4.2* simuliert. Hierfür wurde im reflexionsarmen Halbraum zunächst die Richtcharakteristik der Lautsprechermodule ermittelt. *EASE 4.2* erlaubt auch die Berechnung individueller Filter zur Lautsprecherentzerrung mit Hilfe eines WFS-Operators und ermöglicht somit den Vergleich des von dem WFS-System erzeugten Schallfelds mit dem einer virtuellen Primärquelle. Dieser

22. Vgl. sonic emotion, „Sonic Wave I Product Features“, besucht am 19. August 2019, <http://www2.sonicemotion.com/professional/sonic-wave-i-product-features/#technology>.

23. Vgl. Christoph Moldrzyk u. a., *Wellenfeldsynthese für einen großen Hörsaal* (DAGA 2007-Stuttgart, 2007).



Abb. 4.1.8: Hörsaal H 104 der TU Berlin mit umlaufendem Lautsprecher-Array in der Bauphase.
In: Moldrzyk u. a., *Wellenfeldsynthese für einen großen Hörsaal*, 1



Abb. 4.1.9: Achtkanaliges Lautsprechermodul mit Breitbandsystemen in 10 cm Abstand und Tieftönern in 40 cm Abstand. In: Goertz u. a., *Entwicklung eines achtkanaligen Lautsprechermoduls für die Wellenfeldsynthese*

Vergleich zeigte eine gute Übereinstimmung. Zur Überprüfung des Systems wurden vor Ort verschiedene Messungen durchgeführt. Diese sollten vor allem den Einfluss der Raumakustik auf das System untersuchen. Hierbei zeigte sich, dass auch im hinteren Teil des Saals die ersten Reflexionen um mehr als 6 dB unterdrückt werden.²⁴

Das System wurde in der Vergangenheit z.B. im Jahr 2008 für die Übertragung eines Orgelkonzerts von *Olivier Messiaen* aus dem Kölner Dom genutzt. Die Mikrofonierung wurde hierbei unter der Leitung des IDMT durch Studierende der *Robert-Schumann-Hochschule* realisiert.²⁵

24. Vgl. Moldrzyk u. a., *Wellenfeldsynthese für einen großen Hörsaal*.

25. Vgl. Kunsthochschule für Medien Köln, „Den Kölner Dom in der TU Berlin hören - mit Unterstützung der KHM“, 2008, besucht am 26. August 2019, <https://www.khm.de/termine/news.359.den-koelner-dom-in-der-tu-berlin-hoeren-mit-unterstuetzung-der-khm/>.

5 Vergleich

Im folgenden Abschnitt werden die bisher vorgestellten Beschallungskonzepte miteinander verglichen. Hierfür sollen für die zweidimensionale Beschallung die zentral gestützte Beschallung in Stereo, sowie 5.1-Surround als Vergleichsobjekte dienen. Für die dreidimensionale Beschallung die WFS mit *IOSONO*. Als Kriterien für den Vergleich sollen dabei der Planungsaufwand im Vorfeld der Veranstaltung, der Installationsaufwand, die akustischen Eigenschaften und der Einfluss der verschiedenen Systeme auf das Mixing dienen.

Die zweidimensionale Beschallung mittels zentral gestützter Lautsprecheranordnung wird nachfolgend mit ZBS abgekürzt.

5.1 Planungsaufwand

Jeder Veranstaltungsort hat seine individuellen Eigenschaften im Bezug auf die Raumakustik und den Verwendungszweck der Beschallungsanlage. Vor allem modular aufgebaute Beschallungsanlagen bieten dabei vielfältige Möglichkeiten durch die Kombination verschiedener Lautsprecher, sowie deren Positionierung, optimal auf die jeweiligen Anforderungen einzugehen. Hierfür ist es mittlerweile üblich die PA im Vorfeld einer Veranstaltung mittels Planungssoftware zu simulieren. Hierzu wird zunächst ein dreidimensionales Abbild des zu beschallenden Raums erstellt. Dies kann durch anlegen der jeweiligen Flächen von Hand oder mittels Import einer CAD-Zeichnung aus anderen Programmen erfolgen. Anschließend wird mittels Baloon-Daten der Lautsprecher berechnet, wie sich der Schall im Raum ausbreitet und zu welcher Schallpegelverteilung innerhalb der Hörfläche dies führt. Auch die entstehenden Phasengänge lassen sich so voraussagen.¹

Viele Hersteller von Beschallungsanlagen bieten hierfür eigene Planungswerkzeuge an, welche die Daten für alle Lautsprecher des jeweiligen Herstellers enthalten. Dazu

1. Vgl. Wolfgang Ahnert und Anselm Goertz, „Beschallungstechnik, Beschallungsplanung und Simulation“, in Weinzierl, *Handbuch der Audiotechnik*, 516-518.

gehören z.B. *ArrayCalc* von *d&B-Audiotechnik* sowie *Soundvision* von *L-Acoustics*. Es gibt jedoch auch unabhängige Planungsprogramme wie z.B. *SpeakerLab Tool* oder *EASE*. Da das Vorgehen innerhalb der verschiedenen Planungsprogramme grundsätzlich sehr ähnlich ist, soll an dieser Stelle nicht genauer auf ein bestimmtes Programm eingegangen werden.

Im Gegensatz zu ZBS und 5.1-Surround gibt es für die WFS mit Hilfe der vom PA-Hersteller bereitgestellten Planungssoftware lediglich die Möglichkeit, die erzielbaren Schalldruckpegel zu berechnen. Möchte man auch Berechnungen zum resultierenden Schallfeld vornehmen, kann beispielsweise die Software *EASE* ab der Version 4.2 verwendet werden. Diese erlaubt das Berechnen individueller Filter für jeden Lautsprecher auf Basis eines WFS-Operators. Da im Vergleich zu ZBS und 5.1-Surround aufgrund der großen Menge an Lautsprecherpositionen deutlich mehr Filter erforderlich sind, ist der Planungsaufwand hier entsprechend größer.²

5.2 Installation

Im folgenden wird genauer auf die Eigenschaften der verschiedenen Beschallungskonzepte im Bezug auf die Installation am Veranstaltungsort eingegangen. Hierzu werden zunächst die Eigenschaften von ZBS, 5.1-Surround und *IOSONO* dargestellt, anschließend werden diese miteinander verglichen.

5.2.1 Lautsprecher-Positionierung

Da die optimale Positionierung der Lautsprecher bereits schon in den vergangenen Abschnitten behandelt wurde, soll an dieser Stelle nicht genauer darauf eingegangen werden. Statt dessen werden die mit der Positionierung verbundenen Besonderheiten der jeweiligen Konzepte dargestellt.

Abgesehen von *IOSONO* besteht die PA normalerweise aus einem leistungsstarken Hauptsystem in Bühnennähe, welches um zusätzliche Lautsprecher erweitert wird.

2. Vgl. Moldrzyk u. a., *Wellenfeldsynthese für einen großen Hörsaal*, 1.

Dies sind bei ZBS die Lautsprecher für die Delay-Lines und bei 5.1-Surround die Surround-Lautsprecher (C, LS und RS). Bereits in der Planungsphase lässt sich mittels Simulationssoftware bestimmen, an welchen Punkten diese Lautsprecher positioniert werden sollen. Bei [1] ist die Position hauptsächlich vom Verlauf des Schalldruckpegels über die Hörfläche abhängig und kann sonst frei gewählt werden. 5.1-Surround hingegen erfordert eine standardgerechte Aufstellung der Surround-Lautsprecher mit $\pm 100^\circ$ bis $\pm 120^\circ$ zur Mittelachse der Hörfläche. Dies ist vor allem bei der Verwendung von künstlich erzeugtem Nachhall wichtig, da der Raum sonst nicht korrekt abgebildet werden kann.

Die üblicherweise für ZBS und 5.1-Surround verwendeten Line-Arrays können schon in der Planungsphase genau berechnet werden. Die dabei bestimmten Winkel zwischen den Elementen des Arrays werden üblicherweise mit Hilfe eines Pin-Systems eingestellt, welches eine schnelle Anpassung der Winkelung ohne Werkzeug ermöglicht.³ Die Ausrichtung des kompletten Arrays erfolgt meist mit Hilfe eines Laser-Messsystems, welches in der Aufhängung des Arrays befestigt werden kann.⁴

Bei *IOSONO* ist die Positionierung der Lautsprecher von verschiedenen Faktoren abhängig. Dabei spielt sowohl der gewünschte Schalldruckpegel eine Rolle, als auch der Lautsprecherabstand, welcher das Auftreten von Störungen wie Spatial Aliasing bei der Synthese beeinflusst. Um neben der erforderlichen Anzahl an Lautsprechern auch eine Aussage über die akustischen Eigenschaften des Systems machen zu können, muss die Anlage in einem Simulationsprogramm geplant werden, welches die Verwendung individueller WFS-Operatoren besitzt.

5.2.2 Rigging

Da sich bei ZBS und 5.1-Surround der Großteil der Lautsprecher in Bühnennähe befindet, werden diese normalerweise an geeigneten Punkten im Bühnendach aufgehängt (geflogen). Das Gewicht der Lautsprecher kann hierfür im Simulationsprogramm

3. Vgl. L-Acoustics, „KARA rigging procedures using M-BUMP (EN)“, 2017, 15-17, besucht am 25. August 2019, https://www.l-acoustics.com/wp-content/uploads/2018/02/en_kara_pack_rigging_procedures_1117.zip.

4. Vgl. ebd., 62.

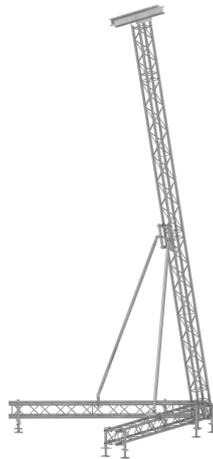


Abb. 5.2.1: Prolyte RT-H30V Rigging-Tower. In: Prolyte Group, „RT-H30V-Datenblatt“, 1

berechnet werden und muss dann in die Planung der Bühne mit einfließen. Für Delay-Lines und Surround-Lautsprecher müssen jeweils eigene Hängepunkte geschaffen werden, falls diese nicht im Raum vorhanden sind. Dies kann entweder über eigens für sie errichtete Traversen-Türme, oder mit Hilfe so genannter *Rigging-Tower* (Abbildung 5.2.1) erfolgen, welche speziell für diese Anwendung konzipiert sind.

Komplizierter gestaltet sich dies bei der WFS. Da die eine Vielzahl an Hängepunkten für die Lautsprecher rund um das Publikum erforderlich sind, bietet sich bei temporären Installationen vor allem die Verwendung einer Traversen-Konstruktion an, welche die gesamte Hörfläche umschließt. Bei großen Veranstaltungen ist dies jedoch mit enormen Aufwand und Kosten verbunden.

5.2.3 Processing

Bei ZBS und 5.1-Surround können bereits in der Planungsphase die Einstellungen für Routing, Delays, Pegel und Filter festgelegt werden. Bei den mittlerweile gängigen DSP-gesteuerten Endstufen lassen sich diese Einstellungen dann per Ethernet auf die Endstufen übertragen. Der Installationsaufwand wird dadurch drastisch reduziert.

Die WFS erlaubt das Anlegen von Lautsprecherpositionen und Routing innerhalb des *IOSONO-Core* mittels Webinterface. Da das System jedoch lediglich den WFS-

Rechner bereit stellt, nicht jedoch die Endstufen etc. muss deren Einrichtung separat erfolgen.

5.3 Akustische Eigenschaften

5.3.1 Positionierung von Schallquellen

Der größte Unterschied zwischen den verschiedenen Beschallungskonzepten ist die Positionierung der Schallquellen. Damit ist nicht die Lautsprecher-Position gemeint, sondern die Position von Phantomschallquellen bei ZBS und 5.1-Surround, sowie von virtuellen Schallquellen bei der WFS. Da ZBS mit Phantomschallquellenbildung arbeitet, lassen sich lediglich Schallquellen auf der Lautsprecherbasis abbilden.

5.1-Surround ermöglicht durch die Surround-Lautsprecher dagegen auch eine seitliche sowie rückseitige Positionierung, wobei zu beachten ist, dass aufgrund der großen Abstände zwischen den Surround-Lautsprechern keine stabile Lokalisation möglich ist.

Da *IOSONO* auf Grundlage der WFS arbeitet, können die virtuellen Schallquellen an beliebigen Punkten der Hörfläche positioniert werden. Im Gegensatz zu ZBS und 5.1-Surround ist also auch eine Stabile seitliche Position, sowie die Positionierung innerhalb der Hörfläche möglich. Wird das System um einen weiteren Ring oder zusätzliche Deckenlautsprecher in der Vertikalen erweitert, können Schallquellen auch außerhalb einer Ebene dargestellt werden, was mit ZBS und 5.1-Surround prinzipiell nicht möglich ist.

5.3.2 Ortung

Eines der Ziele bei der Beschallung ist eine korrekte Ortung der Schallquellen auf der kompletten Hörfläche zu ermöglichen, damit der Bezug zwischen optischem Eindruck auf der Bühne und Hörereignisrichtung übereinstimmen. Vor allem bei ZBS tritt dabei das Problem auf, dass die korrekte Ortung nur innerhalb einer kleinen *Sweet*

Area möglich ist, welche sich mittig von der Bühne ausgehend durch die Hörfläche zieht. Hörer außerhalb dieses Bereichs nehmen als Schallquelle hauptsächlich das jeweils nächstgelegene Array wahr und können die Schallquellen damit nicht mehr auf der Bühne orten.

Durch den zusätzlichen Center-Lautsprecher kann bei 5.1-Surround eine stabilere Ortung innerhalb L-C-R erreicht werden, da die Abstände zwischen den Lautsprechern kleiner sind und mittige Schallereignisse nicht mehr als Phantomschallquelle dargestellt werden müssen. Durch die verhältnismäßig großen Abstände zu den Surround-Lautsprechern ist jedoch keine stabile seitliche Ortung möglich.

Da die WFS nicht auf Basis von Phantomschallquellen arbeitet, sondern die gewünschten Wellenfronten aus Elementarwellen synthetisiert, ist die Ortung weitestgehend unabhängig von der Position des Hörers. Lediglich im Nahbereich der Lautsprecher funktioniert diese nicht korrekt. Dies hat zur Folge, dass die Schallquellen über die komplette Hörfläche präzise geortet werden können und sich sogar ihr Lautstärkeverhältnis passend zum optischen Eindruck der Bühne verändert.

5.3.3 Raumsimulation

Alle Vergleichsobjekte haben die Möglichkeit mittels künstlich erzeugtem Hall eine Räumlichkeit zu erzeugen. Da bei ZBS jedoch der gesamte Schall aus Richtung der Lautsprecherbasis kommt, kann sich der entstehende Raum nur hinter der Basis ausdehnen. Dies hat zur Folge, dass sich Musik zwar räumlich anhört, der Hörer jedoch nicht das Gefühl vermittelt bekommt sich auch in diesem Raum zu befinden, da die seitlichen und rückwärtigen Reflexionen fehlen. Durch die Surround-Lautsprecher bietet 5.1-Surround hier schon mehr Möglichkeiten. So können auch die seitlichen und rückwärtigen Reflexionen abgebildet werden. Sofern diese jedoch durch Phantomschallquellenbildung erzeugt werden, ergibt sich wieder das im vorherigen Abschnitt erläuterte Problem der schlechten Ortung.

Auch in diesem Punkt hat *IOSONO* deutliche Vorteile: Durch die Synthese des Schallfelds kann unter der Voraussetzung möglichst vieler Lautsprecher das Schallfeld eines Raums komplett synthetisiert werden. Dabei können nicht nur Reflexionen auf

der horizontalen Ebene, sondern auch in der Vertikalen erzeugt werden. Der Hörer hat dadurch das Gefühl sich innerhalb des simulierten Raums zu befinden, was an jedem Punkt innerhalb der Hörfläche funktioniert.

5.4 Einfluss und Anforderungen im Bezug auf Mixing

5.4.1 Anforderungen Mischpult

Praktisch jedes gängige Mischpult mit mindestens zwei Ausgängen ⁵ kann in Kombination mit ZBS verwendet werden. Falls keine DSP-gesteuerten Endstufen verwendet werden, muss zusätzlich die Möglichkeit vorhanden sein, ausgangsseitig bestimmte Signale in der zum Abstand passenden Größenordnung zu verzögern.

Im Gegensatz hierzu muss für 5.1-Surround ein surroundfähiges Mischpult vorhanden sein. Am wichtigsten ist hierbei das Vorhandensein eines surroundfähigen Panorama-Potentiometers (Pan-Pot), das es erlaubt die Schallquellen auch auf die Surround-Lautsprecher zu verteilen. Außerdem sollte die Möglichkeit vorhanden sein einen 5.1 Hall zu benutzen um die räumlichen Vorteile dieses Konzepts auch nutzen zu können. Falls kein surroundfähiges Mischpult vorhanden ist, kann trotzdem ein externes 5.1-Hallgerät verwendet werden. Hierzu werden die Signale mittels Stereo-Pan-Pot zwischen L und R verteilt und das resultierende Stereosignal an das Hallgerät übertragen. So entsteht ein räumliches Klangbild, bei dem sich die Schallquellen zwar nur zwischen L-C-R befinden, die Surround-Lautsprecher jedoch trotzdem genutzt werden können.

Bei *IOSONO* erfolgt das Panning der Schallquellen über das Webinterface des *IOSONO-Core*. Hierzu muss für jede virtuelle Schallquelle einzeln das Signal an den Core übertragen werden. Dies können z.B. entweder einzelne Instrumente sein, oder vorher erstellte Submixe. Das Mischpult sollte also die Möglichkeit besitzen

5. +2 Ausgänge pro Delay-Line falls keine DSP-Endstufen verwendet werden

verschiedene Submixe zu erzeugen. Ausgangsseitig muss ein MADI-Anschluss, oder AES/EBU⁶ vorhanden sein.

5.4.2 Panorama

Die bereits beschriebenen Möglichkeiten bezüglich der Positionierung von Schallquellen erlauben vielfältige Möglichkeiten beim Mixing. Durch die Verteilung der Schallquellen im Panorama können einzelne Instrumente im Mix besser wahrgenommen und mit der optischen Position auf der Bühne in Übereinstimmung gebracht werden, falls dies gewünscht ist. Im Gegensatz zu ZBS können die Schallquellen bei 5.1-Surround auch um den Hörer herum positioniert werden. *IOSONO* erweitert dies noch und lässt auch eine Positionierung innerhalb der Hörfläche zu.

5.4.3 Bewegte Schallquellen

Die im vorherigen Abschnitt beschriebene Flexibilität bezüglich der Positionierung von Schallquellen lässt sich dabei nicht nur statisch zuweisen. Auch sich bewegende Schallquellen sind hierbei möglich, was für Effekte wie z.B. ein über das Publikum fliegendes Flugzeug genutzt werden kann. Hierfür eignen sich hauptsächlich 5.1-Surround und *IOSONO*, wobei *IOSONO* durch die Möglichkeit der Positionierung innerhalb des Publikums ein realistischeres Ergebnis ermöglicht. Die Steuerung der Position erfolgt bei 5.1-Surround über den Pan-Pot und bei *IOSONO* über das Webinterface. Bei beiden Konzepten ist dabei auch eine Automatisierung über Timecode möglich.

Jedes verglichene Beschallungskonzept hat seine Vor- und Nachteile. Die Auswahl der am besten geeigneten Variante ist dabei stark von den Anforderungen an ihre Nutzung abhängig. Die zentral gestützte Beschallung besitzt ihre Vorzüge vor allem in der Einfachheit des Systems. Diese zeigt sich sowohl in der Planungsphase also auch bei der Installation vor Ort. Im Bezug auf ihre akustischen Eigenschaften hat dieses

6. Selbstsynchronisierende Audio-Schnittstelle nach AES, *Publication AES3-1992 (ANSI S4.40-1992): AES Recommended Practice for Digital Audio Engineering - Serial Transmission Format for Two Channel Linearly Represented Digital Audio Data.*, AES3-2009

Beschallungskonzept jedoch verschiedene Nachteile. So können Phantomschallquellen lediglich zwischen L und R positioniert werden, was die Flexibilität im Mix stark einschränkt. Da das Konzept mit Phantomschallquellenbildung arbeitet, können Schallquellen außerdem nur in einem relativ kleinen Sweet-Spot korrekt lokalisiert werden. Letztlich ist es nicht möglich dem Hörer das Gefühl echter Räumlichkeit zu geben, da sich der entstehende Raum lediglich hinter der Basis ausbreitet.

Ein Teil dieser Nachteile kann mit 5.1-Surround beseitigt werden. Im Mix hat man durch die Surround-Lautsprecher eine größere Flexibilität im Bezug auf die Schallquellen-Positionierung. Durch den zusätzlichen Center-Lautsprecher verbessert sich außerdem die Lokalisation von Schallquellen und führt zu einem größeren Sweet-Spot. Auch die Erzeugung eines räumlichen Eindrucks ist hierdurch möglich. Im Gegensatz zur zentral gestützten Beschallung wird für eine 5.1-Beschallung jedoch ein spezielles Mischpult benötigt, falls man alle Vorzüge nutzen will. Außerdem entsteht durch die zusätzlichen Lautsprecher-Positionen ein erhöhter Arbeitsaufwand für ihre Installation.

IOSONO bietet im Bezug auf das Mixing die größten Freiheiten. So können virtuelle Schallquellen auf der gesamten Hörfläche positioniert werden, wodurch sich völlig neue Effekte erzeugen lassen. Daneben wird es durch die hervorragenden Eigenschaften bei der Raumsimulation möglich dem Hörer das Gefühl zu geben, sich wirklich im simulierten Raum zu befinden. Da das System nicht auf Phantomschallquellenbildung basiert, erstreckt sich der Sweet-Spot über die gesamte Hörfläche. Dies ermöglicht die korrekte Lokalisation der Schallquellen für alle Hörer, was im Vergleich zur zentral gestützten Beschallung, bei der sich ein Großteil des Publikums außerhalb des Sweet-Spots befindet, einen großen Fortschritt darstellt. Diese Vorteile werden durch eine höhere Komplexität in der Planungsphase, sowie höhere Kosten und Installationsaufwand durch die zusätzlichen Lautsprecher erkauft.

6 Fazit

Das Ziel dieser Arbeit was es, herauszufinden welche Eigenschaften die behandelten Beschallungskonzepte aufweisen und wie diese in der Praxis genutzt werden können. Dazu wurden zunächst verschiedene Grundlagen zur Schallausbreitung, dem menschlichen Hören und dem Zusammenwirken verschiedener Lautsprecher als array erläutert.

Auf dieser Grundlage wurden die verschiedenen Beschallungskonzepte näher vorgestellt. Das erste war die Zweikanal-Stereofonie, welche auf Phantomschallquellenbildung basiert. Hier hat sich gezeigt, dass die Zweikanal-Stereofonie zwar gut auf einer kleinen Hörfläche funktioniert, bei größeren Hörflächen jedoch zu Problemen führt. Diese sind zum einen die schlechte Lokalisation von Schallquellen, wenn sich der Zuhörer außerhalb des Sweet Spots befindet. Zum anderen die eingeschränkten Möglichkeiten beim Mixing. So können Schallquellen beispielsweise lediglich zwischen linken und rechten Lautsprechern positioniert werden.

Nachfolgend wurden verschiedene Surround-Konzepte wie 5.1-Surround und der 7.1-Surround behandelt. Da diese wie auch die Zweikanal-Stereofonie auf der Phantomschallquellenbildung basieren, bleibt auch hier das Problem einer schlechten Lokalisation außerhalb des Sweet Spots bestehen, wobei die zusätzlichen Lautsprecher für die Ortung zwischen L-C-R eine Verbesserung bringen. Außerdem bietet Surround im Gegensatz zur Zweikanal-Stereofonie auch die Möglichkeit einen räumlichen Eindruck zu schaffen, sowie Schallquellen, unter gewissen Einschränkungen, auch um den Zuhörer herum zu positionieren.

Das letzte beschriebene Konzept ist die Wellenfeldsynthese, welche einen gänzlich anderen Ansatz verfolgt als die Stereofonie. Hier werden sogenannte virtuelle Schallquellen nicht mittels Phantomschallquellenbildung erzeugt, sondern durch die Synthese ihres Schallfelds mittels Elementarwellen. Das Hauptproblem hierbei ist der große Bedarf an Lautsprechern, um das Schallfeld auch für hohe Frequenzen korrekt synthetisieren zu können, sowie der hohe Planungs- und Installationsaufwand. Für die Berechnung dieser Lautsprechersignale ist dann auch entsprechende Rechenleistung nötig. Diese Nachteile werden jedoch durch die hervorragenden akustischen

Eigenschaften des Systems aufgewogen. Die Schallquellenortung funktioniert hierbei nahezu unabhängig von der Position des Zuhörers, was für große Veranstaltungen eine erhebliche Verbesserung darstellt. Außerdem erlaubt das Konzept die Positionierung von virtuellen Schallquellen um und in der gesamten Hörfläche. Hierdurch lassen sich völlig neue Effekte erzielen.

Im letzten Abschnitt wurden Zweikanal-Stereofonie mittels zentral gestützter Beschallung, 5.1-Surround, sowie die Wellenfeldsynthese mittels IOSONO miteinander verglichen. Als Kriterien hierfür dienten der Planungs- und Installationsaufwand, die akustischen Eigenschaften, sowie der Einfluss und die Anforderungen im Mixing. Hier hat sich gezeigt, dass jedes der Konzepte seine Stärken und Schwächen hat. Hat man keine besonderen Anforderungen auf die akustischen Eigenschaften, kann auch mit Zweikanal-Stereofonie ein befriedigendes Ergebnis erzielt werden. Hierfür sprechen vor allem ein vergleichsweise niedriger Planungs- und Installationsaufwand, sowie die einfache Funktionsweise des Systems. Soll beim Zuhörer auch das Gefühl von Räumlichkeit entstehen oder spezielle Effekte benutzt werden, sollte jedoch besser auf Surround oder wie WFS zurückgegriffen werden. Der Preis hierfür sind ein erhöhter Planungs- und Installationsaufwand, sowie besondere Anforderungen an die Technik wie Mischpult und Processing.

Im Einzelfall muss also stets abgewogen werden, ob der erhöhte Aufwand gerechtfertigt ist. Wichtig ist dafür auch der Kostenfaktor. Ein genauer Vergleich der Kosten der behandelten Beschallungskonzepte würde jedoch die vollständige Planung des jeweiligen Konzepts in einem konkreten Raum erfordern. Da dies den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde, könnte dieser Punkt Inhalt einer weiteren wissenschaftlichen Arbeit sein.

Literatur

- Ahnert, Wolfgang, und Anselm Goertz. „Beschallungstechnik, Beschallungsplanung und Simulation“. In Weinzierl, *Handbuch der Audiotechnik*, 491–550.
- Ahnert, Wolfgang, und Walter Reichardt. *Grundlagen der Beschallungstechnik*. Stuttgart: Hirzel, 1981.
- Ahnert, Wolfgang, und Frank Steffen. *Beschallungstechnik: Grundlagen und Praxis*. Stuttgart: Hirzel, 1993.
- Ahnert, Wolfgang, und Hans-Peter Tennhardt. „Raumakustik“. In Weinzierl, *Handbuch der Audiotechnik*, 182–266.
- Blauert, Jens, und Jonas Braasch. „Räumliches Hören“. In Weinzierl, *Handbuch der Audiotechnik*, 87–121.
- Dickreiter, Michael. „Grundlagen der Akustik“. In Dickreiter, Dittel, Hoeg und Wöhr, *Handbuch der Tonstudioteknik*, 1:1–65.
- Dickreiter, Michael, Volker Dittel, Wolfgang Hoeg und Martin Wöhr, Hrsg. *Handbuch der Tonstudioteknik*. 8. Aufl. Bd. 1. Berlin: De Gruyter Saur, 2014.
- Dickreiter, Michael, und Jürgen Goeres-Petri. „Schallwahrnehmung“. In Dickreiter, Dittel, Hoeg und Wöhr, *Handbuch der Tonstudioteknik*, 1:115–135.
- Ebner, Michael. *Handbuch der PA-Technik*. 1. Aufl. Aachen: Elektor, 2002.
- Friesecke, Andreas. *Die Audio-Enzyklopädie: Ein Nachschlagewerk für Tontechniker*. 2. Aufl. Berlin: De Gruyter Saur, 2014. doi:10.1515/9783110340181.
- Frisch, H. „Beschallungstechnik“. In *Taschenbuch der Technischen Akustik*, 3. Aufl., herausgegeben von Gerhard Müller und Michael Mößer, 441–458. Berlin: Springer, 2013. doi:10.1007/978-3-642-18893-0_14.
- Goertz, Anselm. „Lautsprecher“. In Weinzierl, *Handbuch der Audiotechnik*, 421–490.

- Goertz, Anselm, Michael Makarski, Christoph Moldrzyk und Stefan Weinzierl. *Entwicklung eines achtkanaligen Lautsprechermoduls für die Wellenfeldsynthese*. DAGA 2007-Stuttgart, 2007.
- Goertz, Anselm, Michael Makarski, Christoph Moldrzyk und Stefan Weinzierl. *Zur Entzerrung von Lautsprechersignalen für die Wellenfeldsynthese*. Paper zur 25. Tonmeistertagung. Institut für Akustik und Audiotechnik, 2008. Besucht am 17. August 2019. <http://www.ifaa-akustik.de/files/TMT-2008-Goertz-Makarski-Weinzierl-Moldrzyk.pdf>.
- Görne, Thomas. *Tontechnik: Hören, Schallwandler, Impulsantwort, Faltung, Sigma-Delta-Wandler, Stereo, Surround, WFS, Regiegeräte, tontechnische Praxis*. 4. Aufl. Herausgegeben von Ulrich Schmidt. München: Carl Hanser, 2014.
- Hartmann, Günther. *Praktische Akustik: Einführung*. Bd. 1. München: R. Oldenbourg, 1964.
- Hartmann, Günther. *Praktische Akustik: Raum- und Bauakustik*. Bd. 2. München: R. Oldenbourg, 1968.
- Ion, Alexandra. „Klangfeldsynthese: Betrachtung der Klangfeldsynthese anhand des IOSONO Systems“. Bachelorarbeit, Fachhochschule Oberösterreich, 2009. Besucht am 19. August 2019. http://alexandraion.com/wp-content/uploads/BachelorsThesis_AlexandraIon.pdf.
- Ludwig, Rafael Philip. „Wellenfeldsynthese für Eventbeschallungen“. Bachelorarbeit, Institut für Signalverarbeitung und Sprachkommunikation der Technischen Universität Graz, 2012. Besucht am 16. August 2019. https://www2.spsc.tugraz.at/www-archive/downloads/BA_Ludwig_Wellenfeldsynthese_f%c3%bcr_Eventbeschallungen.pdf.
- Moldrzyk, Christoph, Anselm Goertz, Michael Makarski, Stefan Feistel, Wolfgang Ahnert und Stefan Weinzierl. *Wellenfeldsynthese für einen großen Hörsaal*. DAGA 2007-Stuttgart, 2007.
- Müller, Helmut A., und Manfred Heckl. *Taschenbuch der technischen Akustik*. 2. Aufl. Berlin: Springer, 1995.

- Nocke, Christian. *Raumakustik im Alltag: Hören - Planen - Verstehen*. Stuttgart: Fraunhofer IRB, 2014.
- Pieper, Frank. *Das P.A. Handbuch : Praktische Einführung in die professionelle Beschallungstechnik*. 4., Aufl. München: GC Carstensen, 2011.
- Reichardt, W., Alim Abdel und W. Schmidt. „Definitionen und Meßgrundlage eines objektiven Maßes zur Ermittlung der Grenze zwischen brauchbarer und unbrauchbarer Dursichtigkeit bei Musikdarbietungen“. *Acustica*, Nr. 32 (3 1975): 126–137.
- Schullan, Bernhard, Ralf Zuleeg und Wolfgang Hoeg. „Beschallung“. In Dickreiter, Dittel, Hoeg und Wöhr, *Handbuch der Tonstudioteknik*, 1:565–612.
- Slavik, Karl M., und Stefan Weinzierl. „Wiedergabeverfahren“. In Weinzierl, *Handbuch der Audiotechnik*, 609–685.
- Theile, Günther, Michael Dickreiter, Wolfram Graul, Florian Camerer und Gerhard Spikofski. „Tonaufnahme und Tonwiedergabe“. In Dickreiter, Dittel, Hoeg und Wöhr, *Handbuch der Tonstudioteknik*, 1:217–369.
- Theile, Günther, Helmut Wittek und Markus Reisinger. *Wellenfeldsynthese-Verfahren: Ein Weg für neue Möglichkeiten der räumlichen Tongestaltung*. Institut für Rundfunktechnik GmbH, 2002. Besucht am 16. August 2019. https://hauptmikrofon.de/theile/2002-3_WFS_22.TMT-2002.pdf.
- Verheijen, Edwin. „Sound Reproduction by Wave Field Synthesis“. Doktorarbeit, TU Delft, 1998. Besucht am 17. August 2019. <http://resolver.tudelft.nl/uuid:9a35b281-f19d-4f08-bec7-64f6920a3821>.
- Weinzierl, Stefan. „Aufnahmeverfahren“. In Weinzierl, *Handbuch der Audiotechnik*, 551–608.
- Weinzierl, Stefan. „Grundlagen“. In Weinzierl, *Handbuch der Audiotechnik*, 1–39.
- Weinzierl, Stefan, Hrsg. *Handbuch der Audiotechnik*. Berlin: Springer, 2008.
- Wirsum, Siegfried. *Praktische Beschallungs-Technik: Gerätekonzepte, Installation, Optimierung; und 12 Tab.* München: Franzis, 1991.

Internet-Quellen

Barco Audio Technologies. „IOSONO CORE: Audio processor for immersive sound experiences“. 2016. Besucht am 19. August 2019. http://www.iosono-sound.com/fileadmin/user_upload/pdf/IOSONO_CORE-specifications.pdf.

Barco Audio Technologies. „IOSONO joining Barco“. 2014. Besucht am 19. August 2019. <http://www.iosono-sound.com/news/detailansicht/iosono-joining-barco/>.

Fraunhofer Institut für digitale Medientechnologie IDMT. „SpatialSound Wave“. 2017. Besucht am 19. August 2019. https://www.idmt.fraunhofer.de/content/dam/idmt/documents/IL/spatialsound_wave_de.pdf.

Kunsthochschule für Medien Köln. „Den Kölner Dom in der TU Berlin hören - mit Unterstützung der KHM“. 2008. Besucht am 26. August 2019. <https://www.khm.de/termine/news.359.den-koelner-dom-in-der-tu-berlin-hoeren-mit-unterstuetzung-der-khm/>.

L-Acoustics. „KARA rigging procedures using M-BUMP (EN)“. 2017. Besucht am 25. August 2019. https://www.l-acoustics.com/wp-content/uploads/2018/02/en_kara_pack_rigging_procedures_1117.zip.

L-Acoustics. „Product Spec Sheet SB18“. Besucht am 14. August 2019. https://www.l-acoustics.com/wp-content/uploads/2018/02/sb18_sp_en_6-0.pdf.

Osborne, Luka. „Remembering The Grateful Dead’s ‘Wall of Sound’: An Absurd Feat of Technological Engineering“. 2018. Besucht am 8. August 2019. <https://enmoreaudio.com/remembering-the-grateful-deads-wall-of-sound-an-absurd-feat-of-technological-engineering/>.

Production Partner - Fachmagazin für Veranstaltungstechnik. „3D Sound mit SpatialSound Wave“. 2016. Besucht am 19. August 2019. <https://www.production-partner.de/story/3d-sound-mit-spatialsound-wave/>.

Prolyte Group. „RT-H30V-Datenblatt“. Besucht am 25. August 2019. <https://www.prolyte.com/uploads/bestanden/Productsheets/rt-h30v-productsheet.pdf>.

Sengpiel, Eberhard. „Berechnung der Schallgeschwindigkeit in Luft und die wirksame Temperatur“. Besucht am 13. August 2019. <http://www.sengpielaudio.com/Rechner-schallgeschw.htm>.

sonic emotion. „Sonic Wave I Product Features“. Besucht am 19. August 2019. <http://www2.sonicemotion.com/professional/sonic-wave-i-product-features/#technology>.

Standards und Normen

AES. *Publication AES3-1992 (ANSI S4.40-1992): AES Recommended Practice for Digital Audio Engineering - Serial Transmission Format for Two Channel Linearly Represented Digital Audio Data.*, AES3-2009.

ITU-Rec. *ITU-R BS.775-1: Multichannel stereophonic sound system with and without accompanying picture*, 1992/1994. Besucht am 21. August 2019. https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bs/R-REC-BS.775-1-199407-S!!PDF-E.pdf.

Abbildungsverzeichnis

2.1.1 Kopfbezogenes Koordinatensystem	4
2.1.2 Summenlokalisationskurven für Pegel- bzw. Laufzeitdifferenzen der beiden Lautsprechersignale	7
2.2.1 Ebene Welle und Kugelwelle	8
2.2.2 Zylinder- und Kugelmantelfläche	10
2.6.1 Ballon zur Darstellung des räumlichen Abstrahlverhaltens eines Laut- sprechers	16
2.8.1 Grateful Dead's Wall Of Sound	19
3.1.1 Standard Lautsprecheranordnung für Zweikanal Stereowiedergabe . .	28
3.1.2 Hörfläche bei Zweikanal-Sterofonie	29
3.2.1 5.1 Lautsprecher Anordnung.	32
3.2.2 5.1- sowie 7.1-Surround Lautsprecher Anordnung und Sweet Area . .	33
4.1.1 Huygens-Fresnel-Prinzip	38
4.1.2 Simulation der räumlichen und spektralen Störung durch Spatial Aliasing	43
4.1.3 Beugungseffekte bei einer weit entfernten synthetisierten Schallquelle	44
4.1.4 Reduzierung von Beugungseffekten	45
4.1.5 Wellenformen durch Reduzierung von Beugungseffekten	45
4.1.6 Sweet Spot bei 5.1-Surround und WFS	47
4.1.7 Hörbereich bei Wellenfeldsynthese	48
4.1.8 Hörsaal H 104 der TU Berlin	52
4.1.9 Achtkanaliges Lautsprechermodul	52
5.2.1 Prolyte RT-H30V Rigging-Tower	58

Abkürzungen, Formelzeichen, Maßeinheiten

Lateinische Formelzeichen

c	Schallgeschwindigkeit	[m/s]	S. (23)
C_{80}	Klarheitsmaß für die ersten Reflexionen	[dB]	S. (13)
E_{80}	Schallenergie innerhalb der ersten 80 ms nach Eintreffen des Direktschalls	[J]	S. (13)
E_{∞}	Gesamte Schallenergie	[J]	S. (13)
f	Frequenz	[Hz]	S. (23)
I	Schallintensität	[m]	S. (9)
l	Länge	[m]	S. (23)
LE	Abstand des zu verzögernden Lautsprechers vom Empfänger	[m]	S. (24)
p	Schalldruck	[Pa]	S. (9)
r	Abstand zur Schallquelle	[m]	S. (9)
r_{edge}	Entfernung der Primärquelle zur Kante	[m]	S. (44)
r_H	Hallradius	[m]	S. (14)
r_{PS}	Abstand Primärquelle-Sekundärquelle	[m]	S. (40)
r_R	Richtentfernung	[m]	S. (21)
r_x	Entfernung Schallquelle-Zuhörerplatz	[m]	S. (14)
S_{PQ}	Signal der Primärquelle		S. (40)
SE	Abstand der zu ortenden Schallquelle vom Empfänger	[m]	S. (24)
T	Nachhallzeit	[s]	S. (14)
T_{30}	Nachhallzeit gemessen über einen Pegelabfall von 30 dB	[s]	S. (11)
T_{60}	Nachhallzeit gemessen über einen Pegelabfall von 60 dB	[s]	S. (11)
V	Raumvolumen	[m ³]	S. (14)
Δx	Lautsprecherabstand	[m]	S. (41)
Δz_0	Verhältnis des Abstands Sekundärquelle-Hörer		S. (40)

z_0	Verhältnis des Abstands Primärquelle- Sekundärquelle		S. (40)
-------	---	--	---------

Griechische Formelzeichen

α_{PW}	Einfallswinkel der ebenen Welle relativ zur Richtung des Lautsprecherarrays	[°]	S. (41)
β_0	Fester Winkel für die optimale Kompensation der Beugungseffekte	[°]	S. (44)
ΔT	Laufzeitverzögerung	[s]	S. (24)
δ	Rotation um die Mittelachse des Lautsprechers	[°]	S. (16)
φ	Drehung in der horizontalen Ebene	[°]	S. (16)
φ_{edge}	Winkel der Primärquelle zur Kante	[°]	S. (44)
Γ	Richtungsfaktor		S. (16)
γ	Bündelungsgrad		S. (16)
λ	Wellenlänge	[m]	S. (10)
ω	Kreisfrequenz	[s ⁻¹]	S. (10)
ϑ	Temperatur	[°C]	S. (25)

Abkürzungen

CAD	Computer Aided Design	S. (55)
DAW	Digital Audio Workstation	S. (50)
HRTF	Head Related Transfer funktion	S. (4)
IDMT	Institut für digitale Medientechnologie	S. (49)
MADI	Multi Channel Audio Digital Interface	S. (49)
WFS	Wellenfeldsynthese	S. (37)
ZBS	Zentral gestützte Beschallung in Stereo	S. (55)